

# Tien päällysteen epätasaisuuden vaikutus ajoneuvojen vierintävastukseen ja ajoneuvokustannuksiin

Tiehallinnon selvityksiä 27/2005



# **Tien päällysteen epätasaisuuden vaikutus ajoneuvojen vierintävastukseen ja ajoneuvokustannuksiin**

**Tiehallinnon selvityksiä 27/2005**



*Kannen kuva: Pasi Sauna-aho, 2003*

Verkkojulkaisu pdf ([www.tiehallinto.fi/julkaisut](http://www.tiehallinto.fi/julkaisut))

ISSN 1459-1553

ISBN 951-803-514-8

TIEH 3200939-v

**Tiehallinto**

Asiantuntijapalvelut

Opastinsilta 12 A

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelinvaihde 0204 2211

**Tien päällysteen epätasaisuuden vaikutus ajoneuvojen vierintävastukseen ja ajoneuvokustannuksiin.** Helsinki 2005. Tiehallinto, asiantuntijapalvelut. Tiehallinnon selvityksiä 27/2005. 51 s. + liitt. 20 s. ISSN 1459-1553, ISBN 951-803-514-8, TIEH 3200939-v.

**Asiasanat:** Tienpäällysteen kunnan tunnusluvut, päällysteen tasaisuus, IRI, RMS, ajovastus, vierintävastus, polttoaineenkulutus, päästöt, ajoneuvokustannukset  
**Aiheluokka:** 02, 30

## TIIVISTELMÄ

Tienpäällysteen epätasaisuus lisää vierintävastusta, polttoaineenkulutusta ja päästöjä. Se aiheuttaa ajoneuvon värinää ja heilahtelua, kuluttaa ajoneuvoa, vähentää ajomukavuutta ja lisää tavarán vaurioitumis- ja onnettomuusriskiä.

Tutkimuksen tavoitteena oli saada tietoa epätasaisuuden vaikutuksesta vierintävastukseen sekä polttoaineenkulutukseen, päästöihin ja kustannuksiin.

Tutkimuksen yhteydessä tehtiin ajokokeita ja kehitettiin uusi menetelmä epätasaisuuden vaikutusten määrittämiseksi. Menetelmä käyttää hyväkseen teiden epätasaisuus- ja pituuskaltevuustietoja, ajoneuvoilla tehtyjä vierintäkokeita sekä ajoneuvodynamiikkaan perustuvaa simulointia.

Erillinen kirjallisuustutkimus antoi tietoa siitä, mitä asiasta tiedetään pääasiassa ulkomaisten tutkimusten perusteella.

Kehitetty menetelmä yhdessä ajoneuvodynamiikkaan perustuvan simuloinnin (= ajoneuvosimulointi) kanssa näyttää soveltuvan tienpäällysteen epätasaisuudesta aiheutuvan vierintävastuksen määrittämiseen riittävän hyvin edellyttäen, että tietiedot sisältävät tien pituuskaltevuustiedot ja ovat luotettavia ja riittävän tarkkoja ja ajoneuvon hidastuvuutta koskevat tiedot kerätään lyhyin aikavälein.

Tutkimuksen mukaan ajoneuvojen vierintävastus riippuu selvästi tien päällysteen epätasaisuudesta. Numeerista riippuvuutta ei määritetty, koska lähtötietojen epätarkkuuden ja liian pitkän keruuajavälin vuoksi tuloksissa olisi liian suuri hajonta ja niissä olisi eräiltä osin epäloogisuutta.

Ajoneuvosimulointi osoittaa, että vierintävastuksen lisäyksen aiheuttama polttoaineenkulutuksen kasvu, varsinkin raskailla ajoneuvoilla, on merkittävästi suurempi kuin ulkomaisissa tutkimuksissa on todettu. Syy on siinä, että raskaiden ajoneuvojen massat ja akselimäärä ovat suuria maassamme. Päällysteen epätasaisuus aiheuttaa suuremman polttoaineen kulutuksen ja kustannukset maassamme kuin mitä ulkomaiset tutkimukset osoittavat.

Jatkotutkimuksissa tulee vierintäkokeiden tietojen keruuvälin olla 1/5 sekuntia tai sitä lyhyempi ja tietietoihin tulee sisällyttää tiedot tien ja päällysteen pituuskaltevuuden määrittämiseksi. Näin voitaisiin määrittää tienpäällysteen epätasaisuuden ja myös muidenkin tekijöiden (esim. kelirikko, lumi, sohjo) aiheuttamia vaikutuksia eli polttoaineenkulutusta, päästöjä ja kustannuksia. Samalla tulisi kehittää uusi, kuvaava ja käyttökelpoinen tunnusluku päällysteen epätasaisuuden osoittamiseen.

Tutkimuksen on tehnyt Vemosim Oy Tiehallinnon tilauksen perusteella ja se on käyttänyt tietietoina tilaajan toimittamia, PTM-järjestelmän (Päällysteiden tasaisuusmittausjärjestelmä) tuottamia tietietoja.

## SAMMANFATTNING

Ojämnhet av vägbeläggningen ökar rullmotstånd, bränsleförbruk och emissioner. Det förorsakar vibration och svängningar och slitning av fordon, förminskar körkomfort och ökar risk för olyckor och godsskador.

Målet var att få information om inverkan av vägbeläggningens ojämnhet på rullmotstånd, bränsleförbruk, emissioner och fordonskostnader.

Man gjorde coast down-prov och utvecklades en ny metod för kvantifiering av ojämnhetens inverkan. Metoden använder data av vägbeläggningens ojämnhet och lutning, av coast down-prov samt simulering baserad på fordonsdynamik (=fordonssimulation).

En separat litteraturutredning gav information över vad man vet på grund av utredningar gjorda utomlands.

Den utvecklade metoden tillsammans med fordonssimulationen verkar passa tillräckligt bra på kvantifiering av inverkan, som vägbeläggningens ojämnhet förorsakar på rullmotstånd förutsättande att vägdata innehåller lutningsdata och är noggranna samt data av fordonens retardation insamlas enligt korta tidsmellanrum.

Enligt studien fordonets rullmotstånd beror klart på vägbeläggningens ojämnhet. Numeriskt beroende var inte kvantifierat därför att det blev för stor variation och liten ologik i resultat på grund av inexakta inputdata och ty långa mellanrum i insamling av kördata.

Fordonssimulationen visar, att bränsleförbruk, som rullmotståndets tillväxt förorsakar är, särskilt för tunga fordon, avsevärt högre vad de utländska studierna förevisar. Orsaken är, att massor och axelantal av tunga fordon i Finland (och i Sverige) är stora. Vägbeläggningens ojämnhet förorsakar högre bränsleförbruk och kostnader i Finland än de utländska studierna indikerar.

Rekommendationer: Tidsmellanrum i insamling av kördata i coast down-provet skall vara 1/5 sekunder eller kortare och vägdata skall innehålla data för kvantifiering av väglutningen. Endast så kan man kvantifiera inverkan som vägbeläggningens ojämnhet och också andra faktorer (menföre och snö) förorsakar på bränsleförbruk, emissioner och kostnader. Man skulle också utveckla en ny, illustrativ och användbar indikator för vägbeläggningens ojämnhet.

Utredningen har gjorts av Vemosim Ab på grund av Vägförvaltningens beställning och den har använt de data som Vägförvaltningens PTM-system (Mätningssystem för beläggningens jämnhet) har producerat.



**Impacts on rolling resistance, fuel consumption and operating cost of unevenness of road pavement.** Helsinki 2005. Finnish Road Administration. Finnra Reports 27/2005. 51 p. + app. 20 p. ISSN 1459-1553, ISBN 951-803-514-8, TIEH 3200939-v.

**Keywords:** Indicators of the condition of road pavement, evenness of road pavement, IRI, RMS, driving resistance, rolling resistance, fuel consumption, emissions, operating costs.

## SUMMARY

The unevenness of road pavement increases the rolling resistance, fuel consumption and emissions of vehicles. It causes vibration and bounce, pitch and roll movements of vehicles, wears out vehicles, reduces driving comfort and increases risks for accidents and damage of goods.

The goal was to obtain information about the impacts on the rolling resistance, fuel consumption, emissions and operating costs of the unevenness of road pavement.

During the study coast down tests were made and a new method for determining the impacts of unevenness was developed. The method utilises data of pavement unevenness and longitudinal gradient of road, coast down tests and vehicle simulation based on driving dynamics.

A separate literature study gave information on what is already known on the basis of studies made mainly abroad.

The method developed together with driving simulation seems to be applicable enough for determining the impact on rolling resistance of the uneven road pavement providing that the road data include longitudinal gradient data and are accurate, and the driving data of vehicles are gathered in short time intervals.

The rolling resistance of vehicles depends clearly on unevenness of road pavement. However, a numeric dependence was not quantified because, due to the inaccurate input data and too long gathering interval of driving data, the results had been unreliable and illogical on some part.

Driving simulation indicates that the increase of fuel consumption caused by increase of rolling resistance, especially for heavy duty vehicles, is remarkably higher than indicated by foreign studies. The reason is that in Finland (as well as in Sweden) the masses and number of axles are bigger than in countries where the studies have been made. The unevenness of road surface causes higher fuel consumption and costs than the other studies indicate.

The time interval in gathering of driving data shall be 1/5 second or shorter and the longitudinal gradient data shall be included into road data. A new indicator for road pavement evenness shall be developed; IRI is not suitable.

The study has been made by Vemosim Ltd for the Finnish Road Administration (=FINNRA), and it has utilised the data gathered in the PTM-system (Measuring system of road pavement evenness) of FINNRA

## ESIPUHE

Teiden päällysteen tasaisuudella on merkittävä vaikutus liikenteelle. Päällysteen ollessa tasainen ajoneuvot liikkuvat tasaisesti ilman tärinää ja heilahte-  
luja ja renkaiden ja päällysteen välinen vierintävastus on pieni.

Tien epätasaisuus fysikaalisessa mielessä tarkoittaa tasausviivan eli pituus-  
leikkauksen pystysuoraa vaihtelua, ts. topografiaa, jolloin nousuvastus muut-  
tuu lyhyillä matkaväleillä. Koska kuitenkin absoluuttisesti sekä horisontaali-  
että vertikaaliset muutokset ovat vähäisiä, on tarkoituksenmukaista selvittää  
voidaanko tällaiset muutokset sisällyttää käsitteeseen vierintävastus.

Päällysteen huonon kunnon aiheuttamista haitoista liikenteelle ei ole riittävää  
tutkimusperäistä tietoa.

Haittojen selvittämisessä tarvitaan kahta tietoryhmää ja niitä käyttävää jär-  
jestelmää:

- tietoja päällysteen tasaisuudesta
- tietoja tasaisuuden vaikutuksesta ajoneuvojen vierintävastuksiin, poltto-  
aineenkulutukseen, jne. sekä
- järjestelmää, joka käyttää edellä mainittuja tietoja ja määrittää haittavai-  
kutukset tasaisuudeltaan erilaisilla päällysteillä.

Tiehallinto käynnisti v. 2003 tutkimuksen, jossa alettiin selvittää haittoja, joita  
päällysteen epätasaisuus aiheuttaa liikenteelle.

Tutkimus on samalla menetelmän kehittämistä ja kokeilua tavoitteena neljä  
asiaa:

- kehittää menetelmää, jota käyttäen tuotetaan tietoa vierintävastuksista  
(ja polttoaineenkulutuksesta sekä ajonopeudesta) ja niiden riippuvuudes-  
ta päällysteen epätasaisuudesta
- testata PTM-järjestelmän tuottamien tietojen, erityisesti tien pituuskalte-  
vuustiedon käyttökelpoisuutta, kun päällysteen tasaisuuden vaikutuksia  
liikenteelle pyritään määrittämään ajoneuvodynamiikkaan perustuen
- pyrkiä luomaan alustavasti riippuvuus päällysteen epätasaisuuden ja vie-  
rintävastuksen välille
- arvioida saadun vierintävastusta koskevan tiedon perusteella simulointi-  
menetelmää käyttäen lisääntyvä polttoaineenkulutus ja päästöt sekä näi-  
den perusteella ajoneuvo- ja päästökustannukset ja mahdollisesti lisään-  
tyvät aikakustannukset esimerkkitapauksissa kahta tyyppiajoneuvoa  
käyttäen.

Työn kuluessa osoittautui, että rekisterimittauksissa käytettävän PTM-  
järjestelmän tuottamat teiden pituuskaltevuustiedot olivat liian epätarkkoja ja  
siten sopimattomia selvityksen pohjatiedoiksi. Kun uudet pituuskaltevuustie-  
dot hankittiin toisella tarkemmalla mittaustekniikalla voitiin tutkimusta jatkaa.

Työhön liittyvien lähtötietojen ja ajoneuvojen liikettä koskevien tietojen ke-  
ruuseen liittyvien epätarkkuuksien vuoksi vain kaksi ensimmäistä tavoitetta  
voitiin toteuttaa. Tavoitetta 3 ei voitu toteuttaa, mutta tavoitteen 4 osalta teh-  
tiin osittain tutkimuksessa saatuihin ja osittain ulkomaisiin tutkimustuloksiin  
perustuen arvio päällysteen epätasaisuuden vaikutuksesta liikenteen poltto-

aineenkulutukseen ja -kustannuksiin kestopäällystetyillä valta-, kanta- ja seututeillä.

Selvitys on tehty Tiehallinnon väyläomaisuuden hallinnan tutkimusohjelman (VOH) osaselvityksenä. Tähän selvitykseen ovat osallistuneet:

Pertti Virtala	Tiehallinto, Keskushallinto, projektiryhmän puheenjohtaja toukokuuhun 2004 asti
Ari Kähkönen	Inframan Oy:stä toukokuusta 2004 alkaen
Jussi Sauna-aho	Vemosim Oy
Pasi Sauna-aho	Vemosim Oy

Tutkimuksen on laatinut Vemosim Oy. Työstä on vastannut tekn. tri Jussi Sauna-aho Vemosim Oy:stä. Työhön on myös osallistunut tiekohteiden alustavan valinnan suorittajana ja tietietojen toimittajana DI Kalervo Mattila Ramboll Finland Oy:stä. Uudet tietiedot toimitti Tieliikelaitos (Arto Kuskelin ja Pauli Alanaatu).

Kenttätutkimuksessa Vemosim Oy:n yhteistyökumppaneina olivat Tiehallinnon yli-ins. Olavi Koskisen lisäksi mittausajoneuvojen toimittajat Sisu Auto, Opel Oy ja Jyky Oy ja mittalaitetoimittaja Paetronics Oy sekä muina yhteistyökumppaneina Osuuskunta Metsäliitto, Kuljetusliike J. Tuominen ja Finnohm Oy sekä lisäksi Jari Sauna-aho. Heille kaikille kiitokset yhteistyöstä.

Helsinki, huhtikuu 2005

Tiehallinto  
Asiantuntijapalvelut



## Sisältö

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b>	<b>11</b>
1.1	Tausta ja ongelmat	11
1.2	Tien päällysteen epätasaisuuden vaikutukset	12
1.3	Tutkimuksen tavoite ja raja	13
1.4	Tutkimuksen rakenne ja toteuttamisprosessi	14
1.5	Käytetyt käsitteet ja termit	14
<b>2</b>	<b>VIERINTÄVASTUKSEN MERKITYS SIMULOINTITUTKIMUSTEN MUKAAN</b>	<b>15</b>
2.1	Eri ajovastusten osuus ajoneuvojen kokonaisvastuksista	15
2.2	Vierintävastuksen muutoksen merkitys	16
<b>3</b>	<b>KENTTÄMITTAUKSET JA TIETIEDOT</b>	<b>21</b>
3.1	Vierintäkokeet ja polttoaineenkulutusmittaukset	21
3.1.1	Mittauksessa käytetyt ajoneuvot ja mittalaitteet	22
3.1.2	Mittauksiin haitallisesti vaikuttaneet seikat	23
3.2	Vierintäkokeet ja polttoaineenkulutusmittausten tulokset	23
3.2.1	Teiden mittausvälit	23
3.2.2	Vierintämittaukset	24
3.2.3	Polttoaineenkulutus vakioajotilassa	24
3.3	Teiden ominaisuudet	26
3.3.1	Teiden pituusleikkaus- ja pituuskaltevuustiedot	27
3.3.2	Teiden päällysteiden tasaisuustiedot	27
<b>4</b>	<b>TIETOJEN ANALYSOINTI</b>	<b>33</b>
4.1	Käytetyn menetelmän perusteet	33
4.2	Ajovastusten määrittämisessä käytetty menetelmä	34
4.2.1	Ajovastusten määrittäminen	34
4.2.2	Koeteiden vierintäkokeiden analysointi sekä simulointi	35
<b>5</b>	<b>TULOKSET</b>	<b>39</b>
5.1	Vierintävastuksen riippuvuus päällysteen tasaisuudesta	39
5.1.1	Ajovastuskertoimet vertailutiellä	39
5.1.2	Vierintävastuksen riippuvuus päällysteen epätasaisuudesta	40
5.1.3	Syyt tuloksissa ilmenneisiin ongelmiin ja niiden mahdollinen tuleva ratkaisu	41
5.1.4	Tuulen nopeuden vaikutus	41
5.2	Arvio päällysteen tasaisuuden heikkenemisen vaikutuksesta	41
<b>6</b>	<b>VERTAILU MUUALLA TEHTYIHIN TUTKIMUKSIIN</b>	<b>43</b>
6.1	Kirjallisuustutkimuksen tulokset	43
6.1.1	Hajahuomiota tutkimuksen sisällöstä	43

---

6.1.2	Kirjallisuustutkimuksen "Johtopäätökset ja suositukset"	44
6.2	Vertailu ulkomaisten ja suomalaisten tutkimustulosten kesken	45
6.2.1	Merkittävä ero vierintävastuslisäyksen aiheuttamassa polttoaineenkulutuksessa	46
6.2.2	Vierintäkoemenetelmän käyttö vierintävastuskertoimien määrittämisessä	46
6.2.3	Muita vierintävastustutkimuksiin liittyviä seikkoja	47
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET	48
7.1	Johtopäätökset	48
7.2	Suosituks	49
8	LÄHDELUETTELO	51
9	LIITTEET	52

---

## 1 JOHDANTO

### 1.1 Tausta ja ongelmat

Päällystettyjen teiden ylläpidon merkittävimmät syyt ovat menneinä vuosina olleet nastarengaskulutuksen aiheuttama urautuminen sekä roudan ja liikennekuormituksen aiheuttamat päällystevauriot. Pituussuuntainen epätasaisuus on ollut mukana yhtenä kuntomuuttujana laskettaessa erilaisten ylläpitovaihtoehtojen yhteiskuntataloudellisia kustannuksia. Tien kunnon vaikutusta ajokustannuksiin on jonkun verran tutkittu, mutta tutkimustulokset ovat melko hajanaisia eivätkä välttämättä sovellu hyvin maamme olosuhteisiin.

Tien päällysteen tasaisuus muodostuu pituussuuntaisesta ja poikittaissuuntaisesta tasaisuudesta. Pituussuuntaisella epätasaisuudella tarkoitetaan tien tasausviivan pystysuuntaista vaihtelua aallonpituusalueella 0.5–50 m ja se ilmoitetaan suureena, josta käytetään nimeä International Roughness Index (IRI). Poikittaissuuntainen tasaisuus ilmoitetaan tavallisimmin poikittaisepätasaisuutena ja urasyvyytenä, kts. tarkemmin /2/.

Tietoja päällysteen tasaisuudesta alettiin tuottaa järjestelmällisesti, kun Tiehallinto käynnisti päällystettyjen yleisten teiden tasaisuusmittaukset vuonna 1989. Vuonna 2003 mittauksiin käytettävä mittaustekniikka uusittiin ja mitattaviin suureisiin lisättiin tasausviivaa koskevien tietojen tuottaminen. Menetelmää sanotaan PTM-järjestelmäksi ja sen tuottamia tietoja hyödynnetään tässä tutkimuksessa. Rekisterimittausten kuntoa kuvaavat tunnusluvut on perinteisesti laskettu käyttäen 100 metrin laskentaväliä, mikä on liian pitkä laskentaväli verrattaessa kunnon vaikutusta ajoneuvojen liikkeeseen. Uusitun mittaustekniikan myötä laskentaväli voidaan valita vapaasti ja tähänkin tutkimukseen on käytettävissä sekä 5 m että 10 m tiedot.

Ajodynamiikkaan perustuvaa ajoneuvojen liiketilan simulointijärjestelmä, Vemosim, on järjestelmä, jonka avulla voidaan tuottaa - ajoneuvon edetessä tietä pitkin - jatkuvasti ajoneuvon nopeus, polttoaineenkulutus ja päästöt lajeittain. Päällysteen epätasaisuustietoa voidaan käyttää hyväksi ajoneuvon liiketilan simuloinnissa.

Päällysteen epätasaisuuden vaikutuksista ei ole toistaiseksi tarjolla riittävästi tietoa eikä myöskään simulointimenettelyn tarjoamista mahdollisuuksista.

**Ongelmat:** Ongelmaksi koetaan paitsi se, ettei ole käyttökelpoista tietoa päällysteen epätasaisuuden vaikutuksista myös se, että tuotetaan merkittävä määrä tietoa teiden päällysteiden tasaisuudesta ja tasausviivasta, mutta tieto on jäänyt analysoimatta ja käyttämättä hyväksi.

Käsillä olevassa selvityksessä pyritään ratkaisemaan tai ainakin lähestymään edellä mainittuja ongelmia siten, että yhdistetään teiden tasaisuustietojen ja Vemosim-järjestelmän käyttö, jotta saataisiin esiin päällysteen tasaisuuden (epätasaisuuden) eräitä vaikutuksia liikenteelle.



## 1.2 Tien päällysteen epätasaisuuden vaikutukset

Tien päällysteen epätasaisuus pituus- ja poikittaissuunnassa aiheuttaa välittömiä ja välillisiä vaikutuksia ajoneuvoihin ja ajoneuvojen kautta tiehen.

**Välittömät vaikutukset:** Tien pituussuuntainen epätasaisuus aiheuttaa välittömiä vaikutuksia, jotka ilmenevät vierintävastuksen muutoksina ja ajoneuvon renkaiden pystysuorana heilahteluna eli radiaalikiikhtyvyytenä. Tien poikittaissuuntainen epätasaisuus ja sen muutos aiheuttaa ajoneuvon renkaiden radiaalikiikhtyvyyden ja samalla akseleiden suunnan muutoksen pystytasossa eli kallistuksen.

**Välilliset vaikutukset:** Välittömistä vaikutuksista seuraa välillisiä vaikutuksia seuraavasti: Vierintävastuksen kasvaessa ajoneuvon polttoaineenkulutus ja sen seurauksena päästömäärät sekä näitä koskevat kustannukset kasvavat. Vierintävastuksen kasvu lisää myös renkaihin ja voimansiirtolinjaan kohdistuvaa rasitusta ja vastaavasti kustannuksia.

Renkaiden radiaalikiikhtyvyys aiheuttaa iskuja paitsi renkaihin myös iskunvaimentimiin ja jousiin sekä edelleen ajoneuvon runkoon. Iskut heijastuvat edelleen kuormatilaan, joko henkilö- tai tavaratilaan tai molempiin. Iskut ilmenevät tai saattavat ilmetä ajoneuvon tai sen osien sekä henkilö- ja tavaratilan tärinänä tai heilahteluna.

Ajoneuvoon kohdistuva rasitus lisää korjaus- ja huoltokustannuksia ja jopa lyhentää pitoaikaa, mikä lisää myös kiinteitä kustannuksia suoriteyksikköä kohden.

Henkilötilaan heijastuva värinä, tärinä ja heilahtelu aiheuttavat ajo- tai matkustusmukavuuden heikkenemistä ja tavaratilaan heijastuva vaikutus vastaavasti tavaratilan rikkoutumisriskiä.

Poikittaissuuntaisen kallistuksen muutos synnyttää ajoneuvon rungon ja kuormatilan heilahtelua. Sen vaikutukset ovat samanlaisia kuin edellä mainitut renkaiden radiaalikiikhtyvyydestä aiheutuvat. Ajoneuvon poikittaiskallistuksen muutos synnyttää lisäksi poikittaiskiihtyvyyttä, jonka arvo voi olla suuri korkean kuorman yläosassa ja pahimmassa tapauksessa ajoneuvo voi kaataa.

Pituus- ja poikittaissuuntaisen epätasaisuuden lisääntyessä ajonopeutta joudutaan vähentämään jarruttamalla ja epätasaisuuden loppuessa nopeutta lisätään ajoneuvoa kiihdyttämällä. Nopeuden vaihtelu merkitsee polttoaineenkulutuksella saavutetun ajoneuvon kineettisen energian hävittämistä "ilmaan" jarrutusvaiheessa ja kiihdytysvaiheessa polttoaineen lisäkulutusta. Tämä nopeuden vaihtelu lisää rasitusta renkaihin, jarruihin ja voimansiirtolinjaan ja sen kautta vastaaviin kustannuksiin. Nopeuden vaihtelu eli pituussuuntaisen kiihtyvyyden muutos heijastuu muutoksina ajomukavuuteen ja tavaratilan rikkoutumisriskiin. Mikäli tien ja renkaiden välinen kitka on pieni, kuten asia on tienpinnan ollessa jäätynyt, epätasaisuus lisää myös onnettomuusriskiä, varsinkin kaarteissa tai metsästä aukealle tultaessa tuulisen sään vallitessa.

### 1.3 Tutkimuksen tavoite ja raja

**Tutkimuksen tavoite** jakaantuu välittömään ja välilliseen.

Välitön tavoite on rajattu siten, että pyritään selvittämään vain epätasaisuuden aiheuttamaa muutosta ajoneuvon vierinnässä verrattaessa vastaavaan vierintään tasaisella päällysteellä. Tällä menetelmällä voidaan arvioida epätasaisuuden sisällyttämiskelpoisuutta vierintävastuskertoimeen. Vastaava vertailu pyritään tekemään myös polttoaineenkulutukselle ajettaessa ko. tieosilla tietyillä tavoitenopeuksilla ja vaihteilla vakioajotiloissa.

Välillinen tavoite on selvittää epätasaisuuden vaikutuksia liikenteen ajokustannuksiin. Tämä tavoite toteutuu, mikäli saadaan tietoa epätasaisuuden vaikutuksesta vierintään (vierintävastuskertoimiin) ja polttoaineenkulutukseen, jolloin voidaan laskea vaikutukset ajokustannusten osatekijöihin, ajoneuvokustannuksiin, ja päästöhaittoihin.

Saadut vaikutustiedot pyritään yhdistämään tien päällysteen tasaisuustietoihin siten, että saataisiin esiin polttoaineen kulutuksen, päästöjen ja ajoajan riippuvuus päällysteen epätasaisuudesta. Epätasaisuutta kuvataan IRI:llä ja muilla pituusprofiilista laskettavilla tunnusluvuista, kuten RMS-arvot sekä mega- ja makrokarkeus, ks. ko. tunnusluvut lähteessä /2/..

Alkuperäisen suunnitelman mukaan ensimmäisen vuoden aikana tehdään vierintä- ja polttoaineenkulutusmittauksia vain sen verran, että voidaan ainakin määrittää ja varmistaa menettelyn sopivuus.

**Rajaus:** Tarkastelu rajataan siten, että päällysteen epätasaisuuden aiheuttamista vaikutuksista tarkastellaan vain kehikon sisällä olevia ja niistäkin ensisijaisesti ensimmäistä:

1. vierintävastusmuutoksen aiheuttama polttoaineenkulutuksen muutos
2. vierintävastusmuutoksen aiheuttama päästöjen muutos
3. epätasaisuuden aiheuttama mahdollinen ajoneuvon nopeuden vaihtelu (hidastaminen ja kiihdyttäminen)
4. epätasaisuudesta aiheutuva ajoneuvon värinä ja heilahtelu sekä tämän sitoma lisäenergian kulutus
5. ajoneuvoon kohdistuvat iskut ja niistä aiheutuva ajoneuvon ja sen osien vaurioituminen ja lisäkuluminen
6. ajomukavuuden heikentyminen ajoneuvon tai sen osien värinän ja heilahtelun vuoksi
7. kuormana olevalle tavaralle aiheutuva rikkoutumisriski (pysty-, poikittais- ja pituussuuntaiset kiihtyvyydet saattavat vaurioittaa tavaraa sen vaurioitumisherkkyydestä riippuen)
8. liikenneonnettomuusriskin kasvu liukkailla keleillä, kun ajoneuvo heilahtelee ja pitoon vaikuttava kitkavoima vähenee.

Muita vaikutuksia voitaneen tarkastella muussa yhteydessä, mikäli tutkimusta jatketaan. Tällöin on tarpeen myös kiihtyvyyssantureiden käyttö mittausajoneuvoissa värinän ja heilahtelujen mittaamiseksi, jotta niiden riippuvuus päällysteen tasaisuudesta voidaan määrittää.



## 1.4 Tutkimuksen rakenne ja toteuttamisprosessi

Tutkimus jakautuu eri vaiheisiin seuraavasti:

1. kenttämittaukset, jotka käsittävät vierintäkokeet (nopeusmittaukset), polttoaineenkulutusmittaukset sekä kohteiden tasaisuusmittaukset
2. ajovastusvastuskertoimien määrittäminen perustilanteessa eli vertailutiellä
3. koeteiden vierintäkokeiden simulointi vertailutien ajovastuskertoimilla ja saatujen nopeuksien vertailu koeteillä mitattuihin nopeuksiin
4. koeteiden epätasaisuudesta aiheutuvan vierintävastuslisän eli epätasaisuusvastuksen määrittäminen, epätasaisuustietojen ja epätasaisuusvastusten analysointi sekä johtopäätökset epätasaisuuden vaikutuksesta vierintävastuksiin
5. epätasaisuuden vaikutus polttoaineenkulutukseen ja päästöihin sekä muuttuviin ajoneuvokustannuksiin.
6. koeteiden polttoaineenkulutuksen analysointi tiemittaustiedoista ja vakioajotilakokeista sekä vastaava simulointi (tarvittaessa).

Tutkimus suunniteltiin toteutettavaksi mainittujen 6 vaiheen mukaisesti, mutta lähtötietojen epätarkkuuden vuoksi vain vaiheet 1–4 toteutettiin. Tutkimus raportoidaan jakamalla sisältö seitsemään lukuun sisällysluettelon mukaisesti.

## 1.5 Käytetyt käsitteet ja termit

Liitteessä 1 esitetään selvityksessä käytettyjä käsitteitä ja termejä sekä lyhenteitä.



## 2 VIERINTÄVASTUKSEN MERKITYS SIMULOINTITUTKIMUSTEN MUKAAN

### 2.1 Eri ajovastusten osuus ajoneuvojen kokonaisvastuksista

Ajovastusten osuutta polttoaineen kulutukseen selvitettiin simuloimalla. Taulukosta 1 ilmenevät tiedot voimansiirtolinjan häviöiden ja eri ajovastusten osuuksista polttoaineenkulutuksen kannalta ajoneuvotyypin ja sen nopeuden mukaan. Ajoneuvotyyppinä ovat tyypillinen henkilöauto (massa 1400 kg) ja ajoneuvoyhdistelmä (kuorma-auto + varsinainen perävaunu, massa 60 000 kg). Lähtötietoina on käytetty laboratoriossa tehtyjä moottorikarttoja, ajovastuksia, tietoja voimansiirtolinjan häviöistä ja muita ajoneuvo- ja tieteknisiä tietoja (Olavi Koskinen).

Vierintävastuksen osuus henkilöautolla on nopeudesta riippuen välillä 27–40 %, mutta ajoneuvoyhdistelmällä se on korkea ja nopeudesta riippuen välillä 46–57 %.

Taulukko 1. Voimansiirtolinjan häviöiden ja ajovastusten vaikutus polttoaineenkulutukseen henkilöautolla ja ajoneuvoyhdistelmällä eri ajonopeuksilla.

Henkilöauto, massa 1.4 t; ajo vakioajotilassa (tasainen nopeus ja vaihde 5)

Nopeus	Polttoaineenkulutus vakiotilassa pituuskaltevuudella 0 %	Polttoaineenkulutuksen vähennys eliminoitaessa voimansiirtolinjan häviöt tai kukin ajovastus vuorollaan		
		Voimansiirtolinjan häviöt [%]	Vierintävastus [%]	Ilmanvastus [%]
	[l/100 km]			
60	5.99	26.7	27.7	15.0
80	6.52	25.2	22.7	23.5
100	7.54	40.2	21.8	44.2
120	9.04	29.8	21.7	44.2

Ajoneuvoyhdistelmä (kuorma-auto + varsinainen perävaunu), massa 60 t;  
ajo vakioajotilassa (tasainen nopeus ja vaihde ylin vaihde)

Nopeus	Polttoaineen- kulutus vakioti- lassa pituus- kaltevuudella 0 %	Polttoaineenkulutuksen vähennys eliminoitaes- sa voimansiirtolinjan häviöt ja kukin ajovastus vuorollaan		
		Voimansiirto- linjan häviöt [%]	Vierintävas- tus [%]	Ilmanvastus [%]
	[l/100 km]			
60	36.82	16.4	56.6	21.8
70	41.12	17.2	55.4	27.7
80	45.92	16.8	51.7	32.2
90	48.88	15.8	46.2	37.0

## 2.2 Vierintävastuksen muutoksen merkitys

Vierintävastuksen muutoksen merkitystä polttoaineen kulutukseen tarkastel-  
laan myös simuloimalla. Taulukosta 2 on esitetty tulokset vierintävastuksen  
muutoksen vaikutuksesta polttoaineenkulutukseen. Ajoneuvotyypit ominai-  
suuksineen ovat samat kuin taulukossa 1 esitetyillä ajoneuvoilla. Myös simu-  
loinnin lähtötietoina käytetyt muut tiedot ovat samat kuin taulukon 1 tuloksia  
määritettäessä käytetyt.

Taulukko 2. Vierintävastuskertoimen vaikutus henkilöauton ja kuormatun ajoneu-  
voyhdistelmän ja polttoaineenkulutukseen ja nopeuteen

(Tulokset perustuvat simulointiin valtatiellä 8 välillä Kokkola-Liminka)

Henkilöauto, massa 1 400 kg		Vierintävastuskerroin		
		0,0125	0,05	0,1
Polttoaineenkulutus	[l/100 km]	7,6	13,7	21,8
	Indeksi	100	179	285
Nopeus	[km/h]	99,8	90,1	58,4
	Indeksi	100	90	59

Ajoneuvoyhdistelmä, massa 60 t		Vierintävastuskerroin			
		0,007	0,02	0,05	0,1
Polttoaineenkulutus	[l/100 km]	48,8	96,5	222	480
	Indeksi	100	198	455	984
Nopeus	[km/h]	79,8	69,3	32,2	16,4
	Indeksi	100	87	40	21

Vierintävastuksen kasvu lisää polttoaineenkulutusta voimakkaasti henkilöau-  
tolla, ja erityisesti ajoneuvoyhdistelmällä.

Mikäli henkilöautolla vierintävastus kasvaa arvosta 0.0125 (vastaa hyvää asfalttibetonipäällystettä) arvoon 0.05 (ehkä pehmeähkö savisora tai yli 10 cm:n lumihanki), kasvaa polttoaineenkulutus noin 80 %. Vierintävastuksen kasvaessa arvoon 0.1 (ehkä pehmeä savisora tai paksu lumi) kasvaa polttoaineenkulutus lähes 3-kertaiseksi asfalttibetoniin verrattuna. Myös nopeus laskee selkeästi.

Kuormatulla ajoneuvoyhdistelmällä vierintävastuksen kasvulla on erittäin suuri vaikutus paitsi polttoaineenkulutukseen myös nopeuteen. Jo 2 %:n vierintävastus (= vierintävastuskerroin 0.02) kaksinkertaistaa polttoaineenkulutuksen ja 5 % nostaa polttoaineenkulutuksen 4.55-kertaiseksi. Kuormatun ajoneuvoyhdistelmän nopeus laskee herkästi ja vierintävastuksen ylittäessä 10 % ajoneuvoyhdistelmän nopeus on alle 10 km/h.

Taulukossa 3 esitetään tulokset nopeuden, polttoaineenkulutuksen ja päästöjen NO<sub>x</sub> ja hiukkasten osalta vierintävastuskertoimen ja ajoneuvon massan eri arvoilla sekä vastaavat muutokset, kun vierintävastuskertoimen arvoa lisätään kustakin lähtöarvosta 10 % ylöspäin.

Tulokset ovat merkittäviä, koska ne poikkeavat huomattavasti siitä, mitä ulkomaisissa tutkimuksissa on saatu, ks. luku 6 ja kappale 6.2, jossa tehdään vertailu näiden ja ulkomaisten tutkimustulosten kesken.

**Taulukko 3** Vierintävastuksen muutoksen vaikutus ajoneuvoyhdistelmän ja henkilöauton nopeuteen, polttoaineenkulutukseen sekä päästöihin vierintävastuksen perusarvon ja ajoneuvon massan mukaan

(Perustuu ajoneuvosimulointiin valtatiellä 8 välillä Kokkola-Liminka)

**Ajoneuvoyhdistelmä**

	Vierintävastuksen perusarvo		
	0,007	0,01	0,02
	Vierintävastuksen 10 %:n lisäyksen muutosvaikutus		
Ajoneuvon massa	20 000 kg		
Nopeusmuutos	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Polttoaineenkulutusmuutos	+ 3,1 %	+ 3,8 %	+ 5,0 %
Typpioksidimuutos	+ 4,7 %	+ 6,2 %	+ 0,8 %
Hiukkasmuutos	+ 5,1 %	+ 4,3 %	+ 6,9 %
Ajoneuvon massa	40 000 kg		
Nopeusmuutos	0,0 %	0,0 %	- 1,0 %
Polttoaineenkulutusmuutos	+ 4,8 %	+ 5,8 %	+ 6,6 %
Typpioksidimuutos	+ 6,5 %	+ 2,3 %	+ 5,3 %
Hiukkasmuutos	+ 5,6 %	+ 7,2 %	+ 7,5 %
Ajoneuvon massa	60 000 kg		
Nopeusmuutos	- 0,2 %	- 0,4 %	- 2,5 %
Polttoaineenkulutusmuutos	+ 5,8 %	+ 6,6 %	+ 6,0 %
Typpioksidimuutos	+ 1,9 %	+ 3,8 %	+ 13,7 %
Hiukkasmuutos	+ 6,7 %	+ 7,0 %	- 15,6 %



### Henkilöauto

	Vierintävastuksen perus- arvo	
	0,0125	0,02
	Vierintävastuksen 10 %:n lisäyksen muutosvaiku- tus	
Ajoneuvon massa	1 200 kg	
Nopeusmuutos	0,0 %	0,0 %
Polttoaineenkulutusmuutos	+ 1,8 %	+ 3,0 %
Typpioksidimuutos	+ 9,4 %	+ 14,3 %
Ajoneuvon massa	1 500 kg	
Nopeusmuutos	0,0 %	- 0,1 %
Polttoaineenkulutusmuutos	+ 2,4 %	+ 3,8 %
Typpioksidimuutos	+ 10,0 %	+11,4 %

*Johtopäätökset:* Vierintävastuksen osuus voimansiirtolinjan häviöiden ja ajo-  
vastusten yhteisvaikutuksesta polttoaineenkulutukseen on henkilöautolla  
22–28 % ja huomattavasti suurempi ajoneuvoyhdistelmällä eli välillä 46–57  
%.

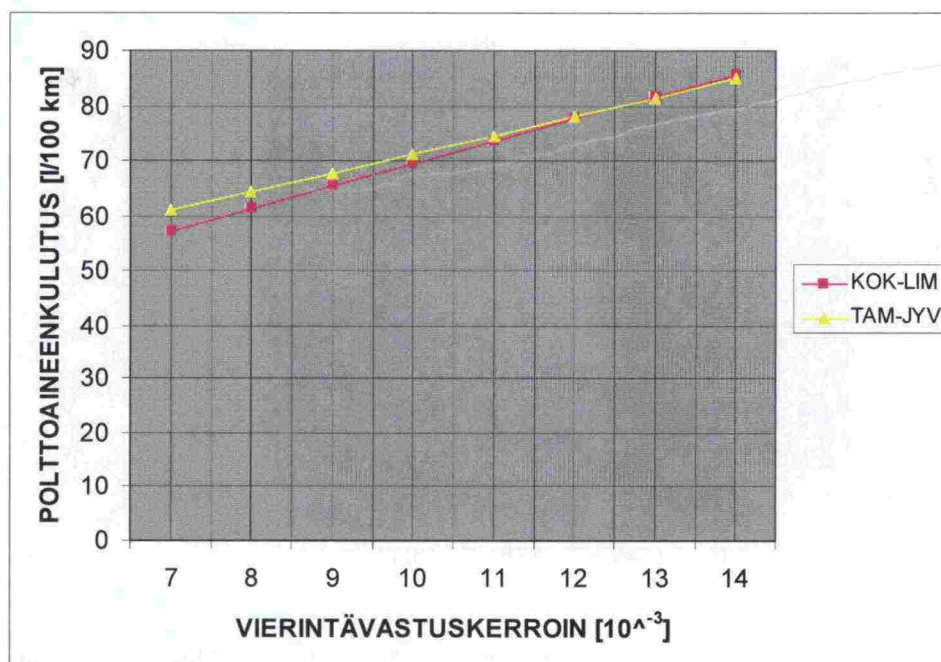
Vierintävastuksen muutoksella (alueelta HYVÄ asfalttibetoni alueelle  
HUONO/ERITTÄIN HUONO savisora) on merkittävä vaikutus henkilöauton  
polttoaineenkulutukseen ja myös nopeuteen. Vastaavalla muutoksella on  
aivan ratkaiseva vaikutus kuormatun ajoneuvoyhdistelmän polttoaineenkulu-  
tukseen ja nopeuteen.

Vierintävastukseen vaikuttavilla tietekijöillä, pääasiassa tien päällysteellä ja  
sen kunnolla (ja talvella kunnossapidolla) on täten suuri merkitys ajotalou-  
teen ja samalla päästömääriin ja myös ajonopeuteen.

Vierintävastuksen muutosta tarkastellaan lisäksi Olavi H. Koskisen tekemän  
simulointiselvityksen perusteella. Selvitys koskee kahta tieosaa Kokkola-  
Liminka ja Tampere-Jyväskylä /1/.

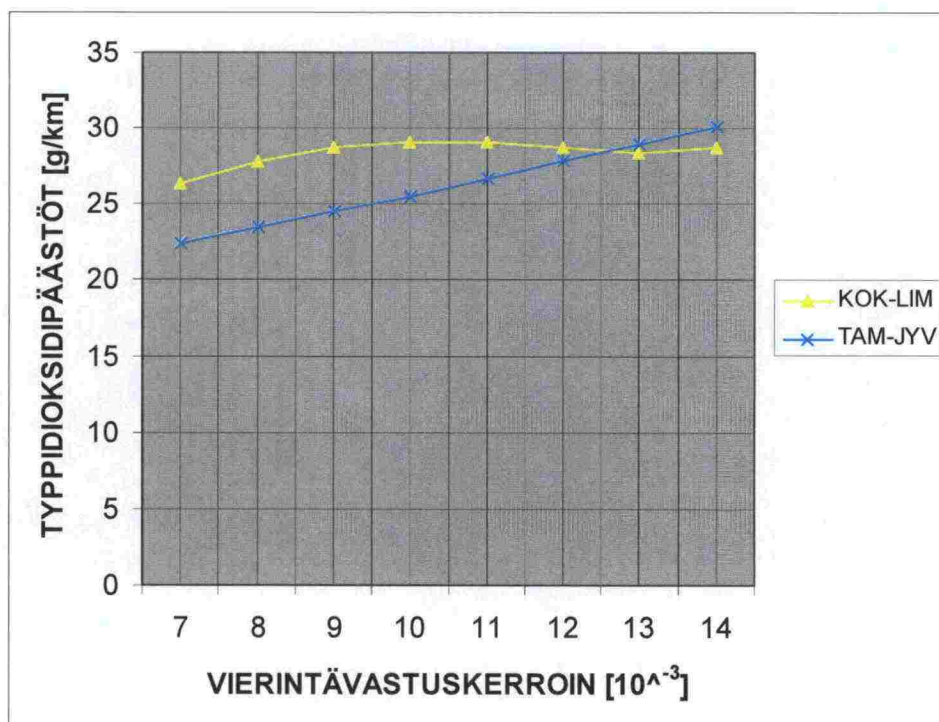
Kuvasta 1 havaitaan, että vierintävastuksen kasvaessa arvosta 0.7 % ar-  
voon 1.4 %, kasvaa polttoaineenkulutus ajoneuvoyhdistelmällä lähes 50 %.  
Typpioksidipäästöjen kasvu vaihtelee välillä 10–25 % reitistä riippuen, kuva  
2, ja keskinopeuden väheneminen on muutama prosentti, kuva 3.

Tämän vuoksi on tärkeää selvittää, miten päällysteen epätasaisuuden li-  
isääntyminen vaikuttaa vierintävastuskertoimiin sekä samalla polttoaineenku-  
lutukseen ja päästöihin.

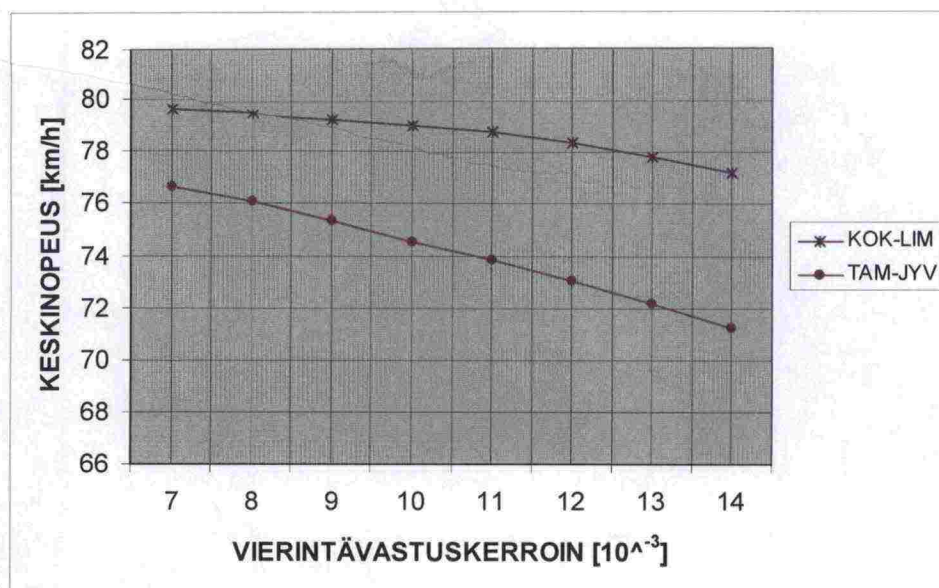


Selitys: KOK-LIM = Kokkola – Liminka  
TAM-JYV = Tampere - Jyväskylä

Kuva 1. Vierintävastuskertoimen vaikutus kuormatun ajoneuvoyhdistelmän polttoaineenkulutukseen /1/



Kuva 2. Vierintävastuskertoimen vaikutus ajoneuvoyhdistelmän typpioksidipäästöihin /1/



Kuva 3. Vierintävastuskertoimen vaikutus kuormatun ajoneuvoyhdistelmän keskinopeuteen /1/



### 3 KENTTÄMITTAUKSET JA TIETIEDOT

#### 3.1 Vierintäkokeet ja polttoaineenkulutustmittaukset

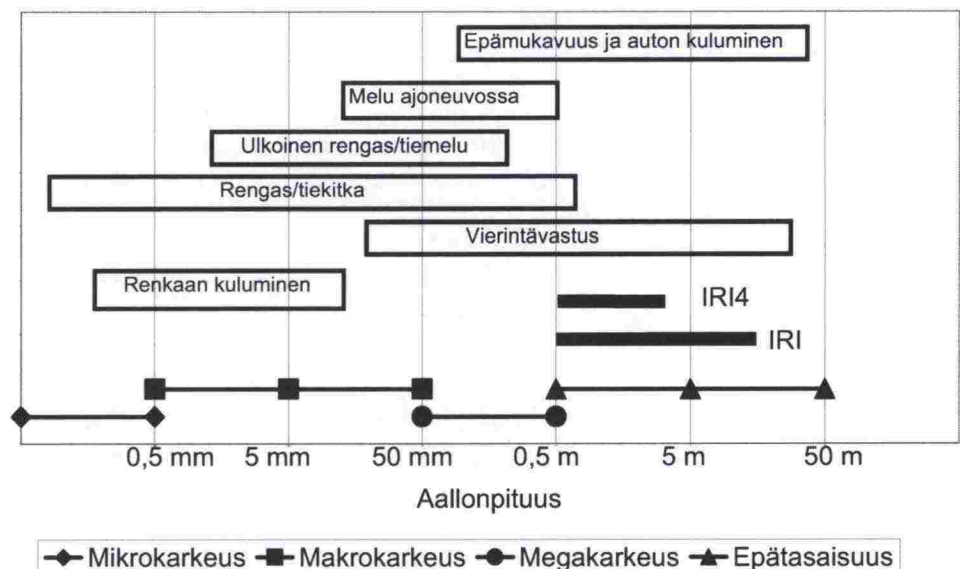
Kuvasta 4 ilmenee tien päällysteen epätasaisuuden vaikutus vierintävastukseen ja eräisiin muihin asioihin epätasaisuuden aallonpituuden mukaan.

Vierintäkokeiden ja polttoaineenkulutustmittausten tavoitteena oli määrittää tien päällysteen epätasaisuuden vaikutusta

- ajovastusten yhteen tekijään, ajoneuvon vierintävastukseen ja
- ajoneuvojen polttoaineenkulutukseen

Samalla pyritään selvittämään, millainen riippuvuus saadaan em. tekijöiden ja päällysteen epätasaisuutta osoittavien tunnuslukujen välille. Edelleen pyritään selvittämään, mikä riippuvuus on päällysteen tasaisuuden ja ajoneuvokustannusten ja päästöhaittojen sekä mahdollisesti myös ajoneuvojen aikakustannusten välillä.

Pituussuuntaisen epätasaisuuden vaikutus eri tekijöihin riippuu siitä, millä algoritmilla ja miltä aallonpituusalueelta tunnusluku on laskettu. Kuvassa 4 on havainnollistettu tätä.



Kuva 4. Päällysteen epätasaisuuden vaikutus vierintävastukseen ja eräisiin muihin asioihin epätasaisuuden aallonpituuden mukaan /7/

### 3.1.1 Mittauksessa käytetyt ajoneuvot ja mittalaitteet

#### Ajoneuvojen valintaperusteet

Mittauksissa käytettiin kahta tyyppiajoneuvoa: henkilöautoa ja ajoneuvoyhdistelmää (kuorma-auto + varsinainen perävaunu). Näin saatiin tietoa päällysteen tasaisuuden vaikutuksesta em. tekijöihin kahden tärkeimmän maamme tie- ja katuverkkoja käyttävän ajoneuvoryhmän osalta.

Henkilöauton osuus henkilöautojen ja linja-autojen yhteisestä liikennesuoritteesta (ajonkm) oli maassamme lähes 99 % ja kuljetussuoritteesta (henkilökm) yli 87 % vuonna 2002 /4/.

Ajoneuvoyhdistelmän (kuorma-auto + varsinainen perävaunu) osuus tavarankuljetukseen käytettyjen ajoneuvojen (pakettiauto, kuorma-auto ilman perävaunua sekä kuorma-auto + puoli- tai varsinainen perävaunu) yhteisestä kuljetussuoritteesta (tkm) tie- ja katuverkolla on arviolta yli 80 %.

#### Ajoneuvojen ominaisuudet

Henkilöauto: Opel Vectra 3.2 V6. Tämä moottorikooltaan keskimääräistä suurempi henkilöauto valittiin edullisen tarjouksen perusteella, vaikkei siitä ollut tarjolla moottorikarttoja. Lisäperusteina oli se, ettei myöskään vaihtoehtoisista tarjolla olevista henkilöautoista ollut käytettävissä moottorikarttoja, eikä niitä voitu tehdä hankkeen yhteydessä resurssien rajallisuuden vuoksi.

Ajoneuvoyhdistelmä: Sisu E14M-530 kuorma-auto + Jykin puutavaraperävaunu. Se valittiin teknisten ominaisuuksiensa sopivuuden vuoksi ja siksi, että sen moottorista oli olemassa moottorikartat.

Molempien mittausajoneuvojen tekniset ominaisuudet ilmenevät liitteestä 2.

#### Mittalaitteet

Molempien ajoneuvojen moottorin ohjausyksikköön asennettiin lukulaite, jolla tarvittavat tietovirrat saatiin luettua ja lähetettyä mittalaitteelle. Käytössä oli yksi Econen -mittalaite, jota käytettiin molemmissa ajoneuvoissa. Ecoseen yhdistettiin kannettava tietokone, jolle tiedot kerättiin sekunnin välein.

Econen kerää valituin aikavälein (minimi on 1 sekunti) seuraavat tiedot:

- päivämäärä
- kellonaika
- käyttäjän määrittämä tieto
- nopeus
- kulutus
- polttoaine
- matka
- aika
- moottorin pyörimisnopeus

Lämpötilan mittaukseen käytettiin ajoneuvojen ulkolämpötilamittareita. Ilmapaine mitattiin tarkkuusilmanpainemittarilla, jonka erotustarkkuus on 1 Pa.

### 3.1.2 Mittauksiin haitallisesti vaikuttaneet seikat

Mittauksia haittasi ja viivytti eräät tekijät, jotka todetaan luettelomaisesti:

- Kenttämittausten koesuunnittelu vaikeutui, koska
  - tietiedot kohteista saatiin vasta kenttämittausten jälkeen; siksi kenttämittauksia ei voitu suunnitella kunnolla etukäteen
  - koetiekohteisiin ei voitu tutustua etukäteen ja siksi paikan päällä jouduttiin hylkäämään kolme kohdetta.
- Kuorma-auton nopeusrajoittimen arvoa jouduttiin muuttamaan tilapäisesti, jotta vierintäkokeet saatiin asianmukaisesti suoritetuksi niin, että ilman virtauksen mahdollinen irtoaminen (turbulenssi) saataisiin esiin. Muutoksen tekeminen edellytti monivaiheisia neuvotteluja viranomaisten ja ajoneuvon vuokraajan kanssa.

### Tehdyt kenttämittaukset

Kenttämittaukset tehtiin 26.–31.8.2003. Esimerkki mittauspöytäkirjasta tien 17519 osalta on liitteessä 3.

## 3.2 Vierintäkokeet ja polttoaineenkulutusmittausten tulokset

### 3.2.1 Teiden mittausvälit

Teiden mittausvälit (paaluvälit) ja matkat ilmenevät taulukosta 4.

Taulukko 4. Teiden mittausvälit ja matkat

Tien nro	Tieosan nro	Suunta	Alkupaalu	Loppupaalu	Pituus [m]	Pituus yhteensä [m]
54	14	1	560	1970	1410	1410
687	8	1	2520	4246	1726	
	9	1	0	2250	2250	3980
697	4	1	1220	2895	1675	
	5	1	0	1830	1830	3500
17519	2	1	3720	5720	2000	2000

Matkamittaukset suoritettiin sekä auton matkamittarilla, Econen-matkamittarilla että GPS-laitteella. Mittausvälit pyöristettiin pääsääntöisesti 20 metrin tarkkuudelle.

Koe suoritettiin kantatien 54 tieosalla 14, jonka pituus on 1 410 m ja kaltevuus 0.1 %.

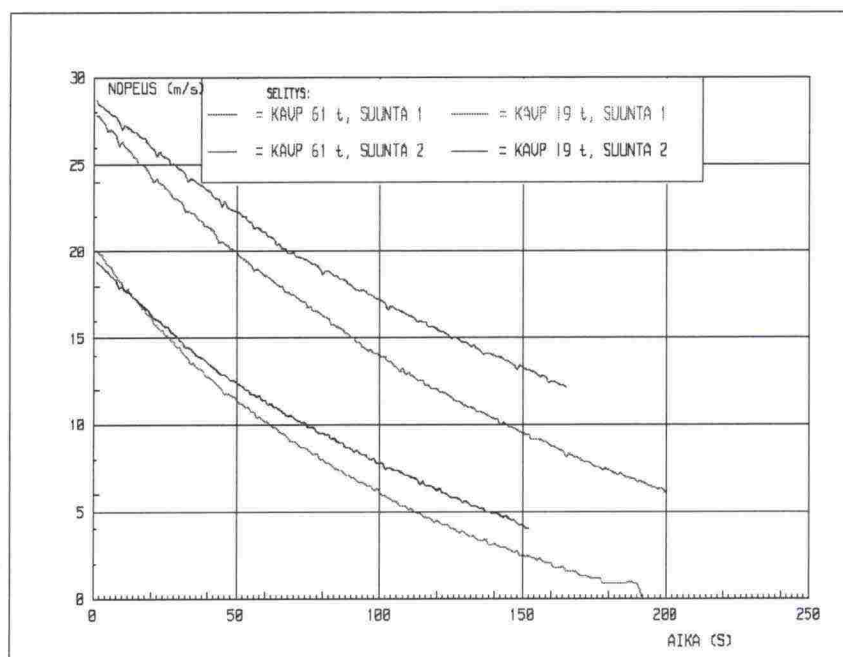


### 3.2.2 Vierintämittaukset

Vierintämittausten aineisto käsiteltiin ja luotiin tiedostot koskemaan kunkin tieosan mittavälejä ja ajoneuvoja. Vierintäkokeet tehtiin mittausvälin pituudesta riippuen tarpeen mukaan 1–3 sarjana molemmissa suunnissa.

Koska vertailutien mittavälin pituus on lyhyt (1 410 m), ajoneuvo ei ehdi pysähtyä mittavälillä käytettäessä suurta alkunopeutta. Siksi vierintäkokeet toistettiin pienentämällä alkunopeutta, kunnes ajoneuvo pysähtyi. Tämän jälkeen saman ajosuunnan vierintäkokeiden nopeus-aikakäyrät ketjutetaan liittämällä (oskuloimalla) nopeus-aikakäyrät osittain päällekkäin. Saadaan pitkä mittausväli, jonka kuluessa ajoneuvon nopeus vähenee korkeasta arvosta arvoon 0 m/s tai lähelle sitä. Samalla saadaan nopeusarvoille suuri vaihteluväli, mikä on tärkeä muodostettaessa funktiota ko. käyrälle.

Kuvasta 5 ilmenee kuormatun ja kuormaamattoman ajoneuvoyhdistelmän ketjutetut nopeudet tiellä 54 suunnittain.



Kuva 5. Kuormatun ja kuormaamattoman ajoneuvoyhdistelmän ketjutetut vierintänopeudet tiellä 54 suunnittain

### 3.2.3 Polttoaineenkulutus vakioajotilassa

Polttoaineenkulutuksista vakioajotilassa (tavoitenopeus vakio ja vaihde muuttumaton) tehtiin taulukkojen 5 ja 8 mukaiset mittaukset. Taulukko 8 on raportin lopussa, kuten kaikki muutkin leveät taulukot.

Esimerkki henkilöauton hetkellisestä polttoaineenkulutuksesta ja nopeudesta vakioajotilassa tavoitenopeuden mukaan tiellä 17519 ilmenee kuvasta 6 ja vastaava kuormatulla ajoneuvoyhdistelmällä kuvasta 7.

Kuvista havaitaan, että tavoitenopeus voidaan säilyttää sekä henkilöautolla että kuormatulla ajoneuvoyhdistelmällä hyvin. Hetkelliset nopeudet eivät juuri vaihtele, sillä päällysteen epätasaisuus ei vaikuta niihin edes tiellä 17519, jonka tasaisuus on koeteistä huonoin.

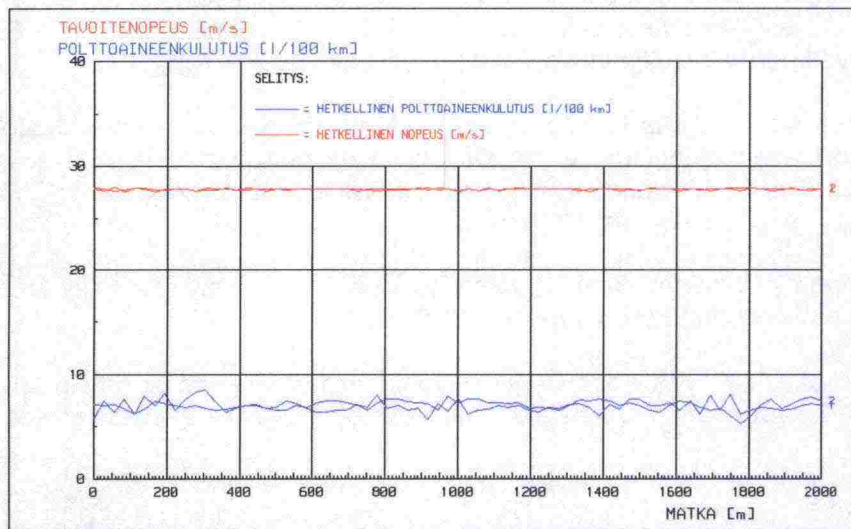
Hetkellinen polttoaineenkulutus vaihtelee vain hiukan henkilöautolla, mutta erittäin paljon kuormatulla ajoneuvoyhdistelmällä.

Vierintäkokeiden sekä nopeus- ja polttoainemittausten lisäksi tehtiin jarrutuskokeet kuormaamattomalla ajoneuvoyhdistelmällä tiellä 54 Hausjärvellä.

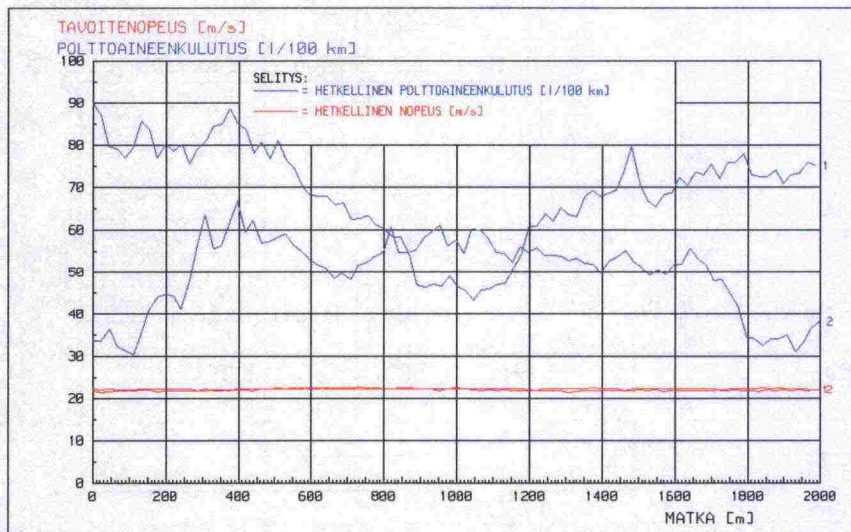
Taulukko 5. Henkilöauton polttoaineenkulutus vakioajotilassa eri teillä

Tavoitenopeus	Vaihde	Tie 54		Tie 697		Tie 17519	
		Keskimääräinen polttoaineenkulutus [l/100 km]					
[km/h]		Suunta		Suunta		Suunta	
		1	2	1	2	1	2
100	5	6.99	6.24	6.66	6.74	6.94	7.03
	4	7.79	7.12	7.51	7.63	7.64	7.82
90	3	8.88	8.15				
	5	6.48	5.82				
80	4	7.39	6.70				
	5	6.27	5.73	5.96	6.02	6.32	6.35
70	4	7.03	6.48	6.65	6.51	7.08	7.05
	3	7.76	7.21				
60	5	6.02	5.50				
	4	6.69	6.18				
50	5	5.86	5.42	6.00	5.66	5.99	5.90
	4	6.37	5.99	6.27	6.13	6.71	6.58
40	3	7.27	6.81				
	4	6.50	6.11				
	3	7.38	7.26				

Tiellä 687 ei tehty mittauksia henkilöautolla.



Kuva 6. Henkilöauton hetkellinen polttoaineenkulutus ja nopeus vakioajotila-ajoissa tavoitenopeen mukaan tiellä 17519 suunnissa 1 ja 2



Kuva 7. Kuormatun ajoneuvoyhdistelmän hetkellinen polttoaineenkulutus ja nopeus vakioajotila-ajoissa tavoitenopeen mukaan tiellä 17519 suunnissa 1 ja 2

### 3.3 Teiden ominaisuudet

Teiden ominaisuuksina käsitellään pituusleikkausta, pituuskaltevuutta ja päällysteen tasaisuutta.



### 3.3.1 Teiden pituusleikkaus- ja pituuskaltevuustiedot

Pituusleikkaus eli tasausviiva havainnollistaa tien pystygeometriaa.

Valittujen teiden pituusleikkaus- ja pituuskaltevuustiedot saatiin Tiehallinnon toimeksiannosta tehtävän PTM-hankkeen tuloksista. Tie 689 sisältyi kesän 2003 mittausohjelmaan, mutta muut tiet (tiet 687, 17519 ja 54) mitattiin erikseen käsillä olevaa hanketta varten. Mittauksista vastasi Ramboll Finland Oy, joka toimitti tiedot Vemosim Oy:lle.

Ramboll Finland Oy:n toimittamat tiedot teiden pituuskaltevuuksien osalta eivät soveltuneet selvittäessä tienpäällysteen epätasaisuuden vaikutuksia ajoneuvodynamiikkaan perustuvaa simulointia käyttäen.

Tiemittaukset uusittiin kesällä 2004 tekijänä Tieliikelaitos. Tällöin saatiin soveltuvat pituuskaltevuustiedot koeteistä.

Tieliikelaitoksen tiedoista esitetään vertailutien ja koeteiden pituusleikkaukset ja pituuskaltevuudet. Samalla ilmenee tulosten luotettavuus seuraavista syistä:

- eri suuntien pituusleikkaukset ovat toistensa peilikuvia, kuten niiden tulee olla
- eri suuntien pituuskaltevuudet ovat samasta tienkohdasta määritettyä arvoltaan toistensa vastalukuja, kuten pitääkin olla

Kuvassa 17 esitetään vertailutien (tie 54) ja koetiet sisältävien tieosien pituusleikkaukset eli tasausviivat suunnittain.

Havaitaan koeteiden pituusleikkausten pieni vaihtelu verrattuna koko tieosan pituusleikkauksen vaihteluun kaikkien koeteiden ja vertailutien tapauksessa.

Kuvasta 18 ilmenevät vertailutien ja koeteiden pituuskaltevuudet, kun havaintovälinä pituuskaltevuutta määritettäessä käytetään 10 m.

### 3.3.2 Teiden päällysteiden tasaisuustiedot

Tienpäällysteen tasaisuustietoina olivat käytettävissä sekä Ramboll Finland Oy:n että Tieliikelaitoksen mittaustiedot.

Ramboll Finland Oy:n tiedot sisältävät runsaasti tunnuslukuja päällysteen tasaisuudesta eli IRI:t sekä useat RMS-tiedot ja kaistojen poikittaiskaltevuus-, urasyvyys-, ym. tiedot.

Tieliikelaitoksen tiedot sisältävät IRI:n, kaarevuuden pituus- ja poikittaissuunnassa, kaistan poikittaiskaltevuuden, urautumistietoja sekä korkeustiedot mittauslinjoilta. Koska korkeustiedot ovat luotettavia, voidaan niistä määrittää sivukaltevuudet paitsi koko kaistalle myös kaistan osille poikittaissuunnassa.

Aluksi todetaan päällysteen epätasaisuutta koskevat tunnusluvut, joilla muualla tehtyjen selvitysten mukaan /7 ja 10/ on vaikutusta ajoneuvon renkaan ja tien väliseen vierintävastukseen.

Näitä ovat seuraavat (ks. määrittelyt lähteessä /2/):

- tien IRI-epätasaisuus (kaistan vasemmalta ja oikealta reunalta)
- tien RMS-epätasaisuudet (RMS1, RMS2, RMS3 ja RMS4)
- tien makro- ja megakarkeudet (RMSR-karkeamakrokarkeus sekä RMSM-megakarkeus)

Taulukossa 9 on yhteenveto vertailutien ja koeteiden osalta edellä mainittujen tunnuslukujen keskiarvoista erikseen molemmissa suunnissa. Suunta 1 on Tiehallinnon tierekisterin mukainen suunta.

Havaitaan, että vertailutie eli tie 54 on tasaisuudeltaan paras. Suunnan 1 IRI oikea on 1.09 ja IRI vasen 0.99. Suunnan 2 vastaavat arvot ovat 1,21 ja 1,16 eli hiukan suuremmat.

Tien 54 RMS1-arvot ovat 0.14 ja 0.11 ja RMS4-arvot 2.19 ja 2.16.

Tie 17519 on päällysteen tasaisuudeltaan heikoin ja päällyste on epätasais- ta. Suunnan 1 IRI oikea on 2.52 ja IRI vasen 2.33. RMS1-arvot ovat 0.31 ja 0.31 sekä RMS4-arvot 4.14 ja 3.49. Tiet 687 ja 697 asettuvat em. ominai- suuksiltaan vertailutien 54 ja 17519 väliin.

Havaitaan myös, että suuntien välillä on hiukan eroa megakarkeudessa, mutta erot eivät ole suuria, kts. kuva 10.

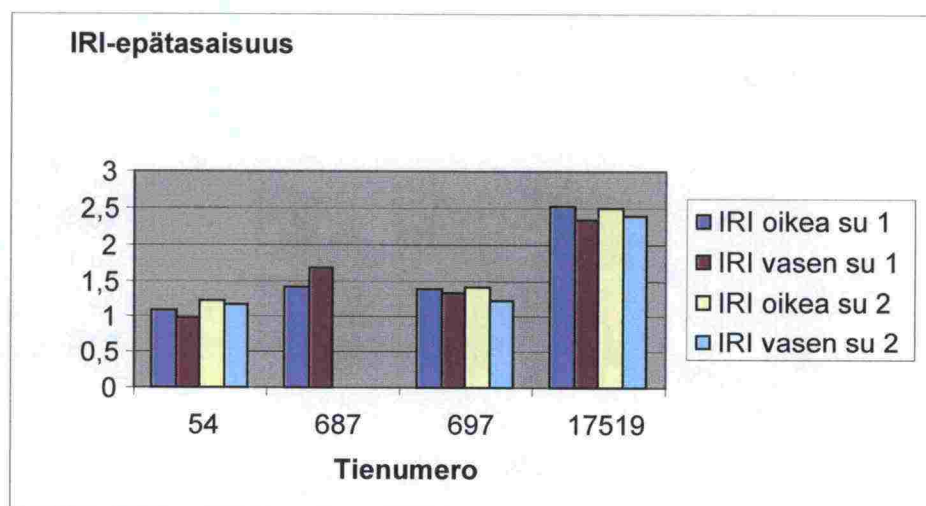
Kuvissa 8 ja 9 esitetään eri teiden IRI-epätasaisuus- ja vastaavasti RMS4- epätasaisuusarvot suunnittain (su 1 ja su 2). Kuvassa 10 on megakarkeutta kuvaavat RMSM-arvot ja kuvassa 11 makrokarkeutta kuvaavat RMSR-arvot.

Mikäli kriteerinä käytetään taulukossa 9 ja kuvassa 8 esitettyjä eri teiden keskimääräisiä IRI-arvoja, ei koeteiden joukossa ole epätasaisuudeltaan huonoa tietä. Tiehallinnon luokituksen mukaan päällysteentasaisuus on ni- mittäin hyvä, kun IRI-arvo alittaa arvon 2.6. Tien päällysteen "huono kunto" on vasta silloin kun IRI ylittää arvon 4.2 /7/.

Kun tarkastellaan IRI-arvojen vaihtelua kullakin tiellä - vertailutietä 54 lukuun ottamatta - havaitaan, että teihin sisältyy myös päällysteen tasaisuudeltaan huonoja osia, kuten kuvasta 14 ilmenee.

Kuvissa 12-14 ovat eri teiden IRI-epätasaisuusarvot sekä RMSM-mega- ja RMSR-makrokarkeusarvot 10 m:n välein suunnassa 1.

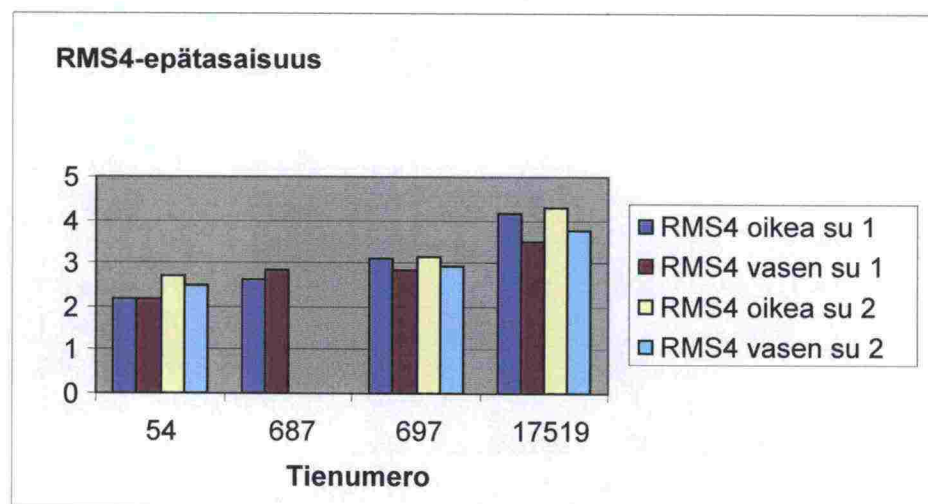
Kuvassa 15 on tien 54 ja 17519 RMS1 - ja RMS4-arvot suunnassa 1.



Selitys:

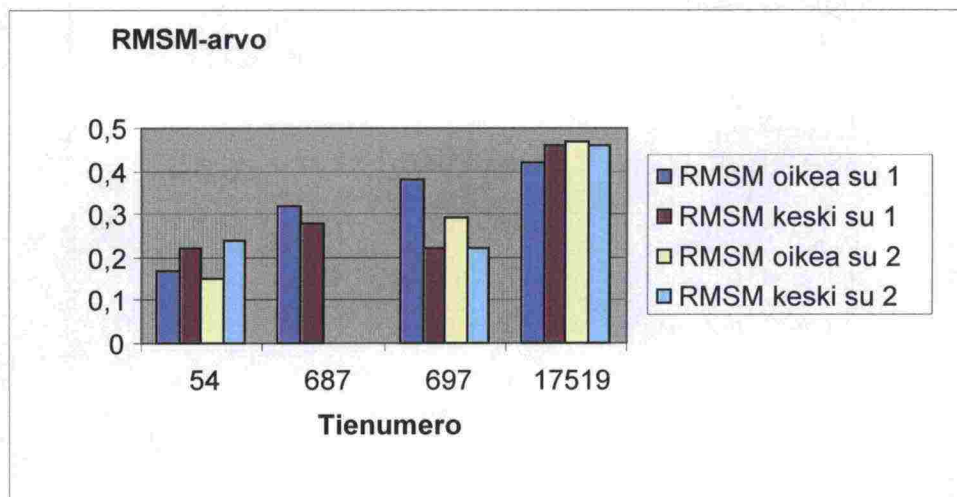
- IRI oikea su 1 = IRI ajokaistan oikealta ajouralta suunnassa 1
- IRI vasen su 1 = IRI ajokaistan vasemmalta ajouralta suunnassa 1

Kuva 8. Teiden keskimääräiset IRI-epätasaisuudet suunnittain



Kuva 9. Teiden keskimääräiset RMS4-epätasaisuudet suunnittain

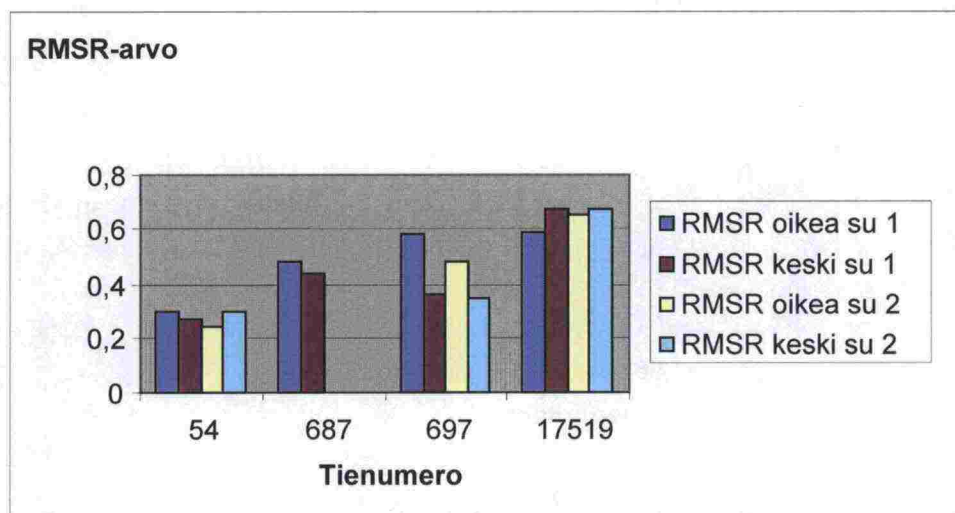




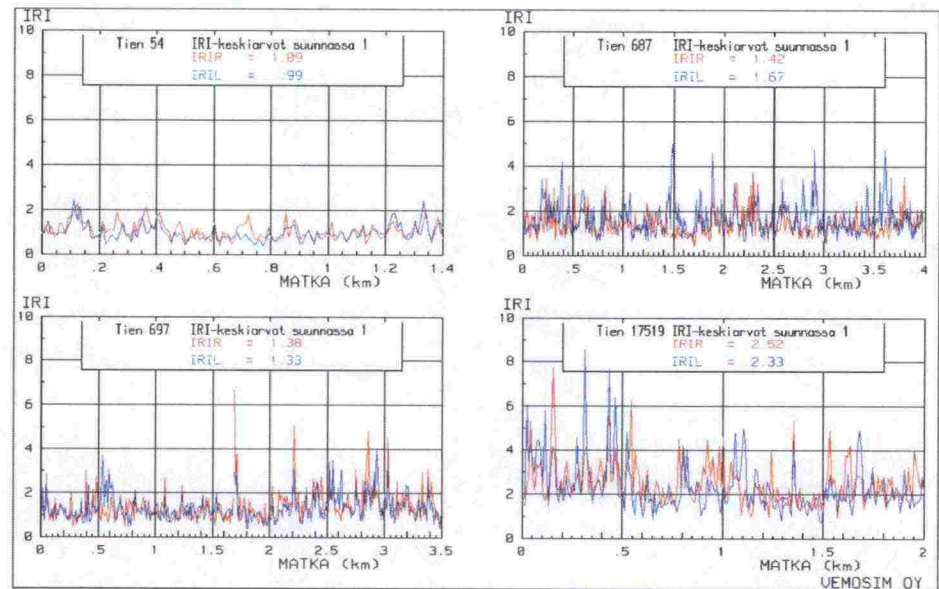
Selitys:

- RMSM oikea su 1 = RMSM ajokaistan oikealta ajouralta suunnassa 1
- RMSM keski su 1 = RMSM ajokaistan keskeltä suunnassa 1

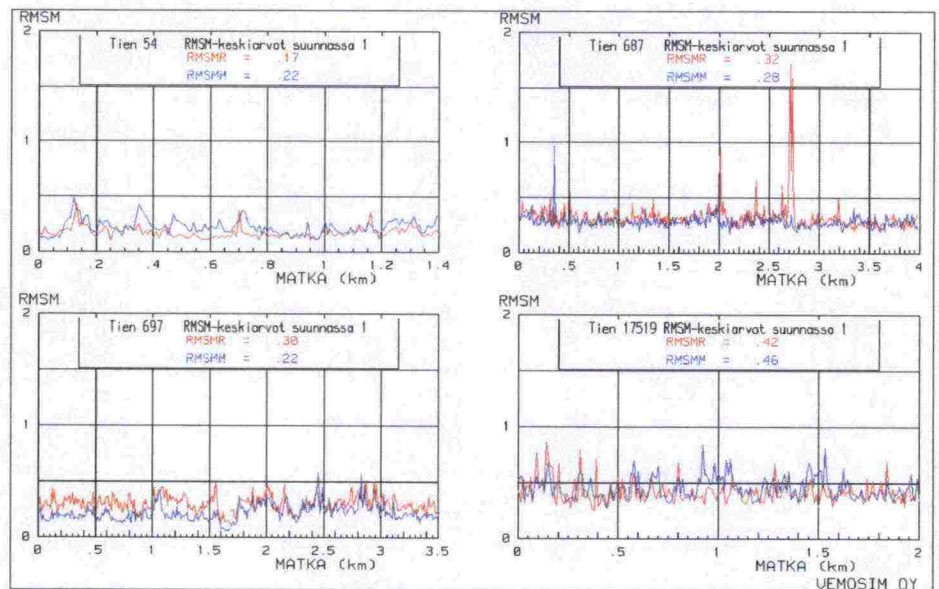
Kuva 10. Teiden keskimääräiset RMSM-megakarkeudet suunnittain



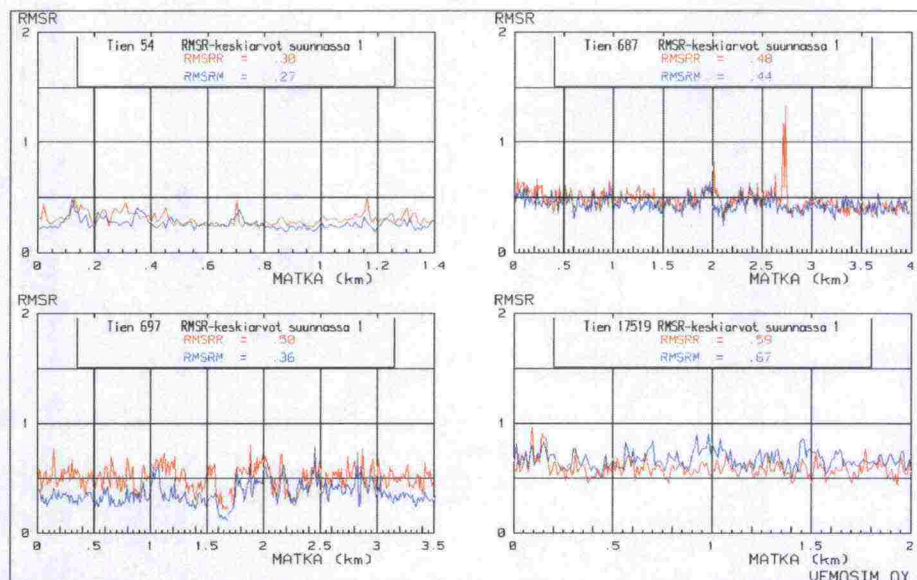
Kuva 11. Teiden keskimääräiset RMSR-makrokarkeudet suunnittain



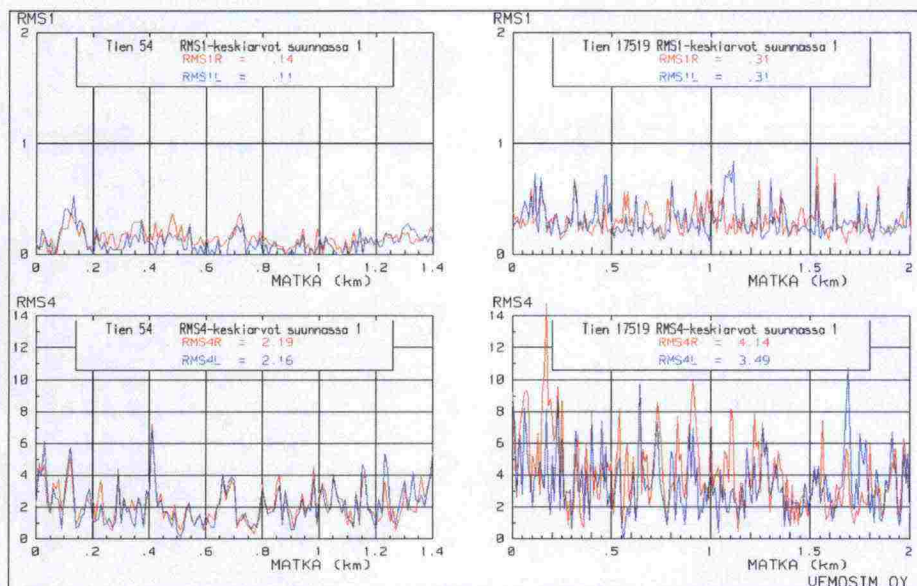
Kuva 12. Teiden päällysteiden IRI-epätasaisuudet määritettynä 10 m:n jaksoilta suunnassa 1



Kuva 13. Teiden päällysteiden RMSM-megakarkeus määritettynä 10 m:n jaksoilta suunnassa 1



Kuva 14. Teiden päällysteiden RMSR-makrokarkeudet määritettynä 10 m:n jaksoilta suunnassa 1



Kuva 15. Tien 54 ja 17519 päällysteen RMS1- ja RMS4-epätasaisuudet määritettynä 10 m:n jaksoilta suunnassa 1



## 4 TIETOJEN ANALYSOINTI

Tässä luvussa kuvataan käytetyn menetelmän perusteet ja vierintävastuksen määrittäminen työvaiheittain.

Analysointimenetelmä, jonka avulla määritetään epätasaisuuden vaikutus vierintävastukseen, on kehitetty työn kuluessa ja kehittämisen ajodynamiikkavaiheen osalta on tehnyt Olavi H. Koskinen. Vemosim Oy on soveltanut menetelmää ja tehnyt analysoinnit.

### 4.1 Käytetyn menetelmän perusteet

Menetelmän lähtötietoina ovat tiedot (päällysteen epätasaisuus ja pituuskaltevuus) ja ajoneuvoilla suoritettut mittaukset eli kenttämittaukset sekä vertailu- että koeteillä. Tämän jälkeen määritetään ajovastuskertoimet vertailutiellä, tehdään vierintäkokeiden nopeussimuloinnit koeteillä, vertaillaan koe-  
teiden simuloituja ja mitattuja nopeuksia keskenään ja määritetään niiden välisten erojen perusteella vierintävastuksen lisäykset kullakin koetiellä vertailutiehen verrattuna. Ko. erosta käytetään tässä yhteydessä nimitystä epätasaisuusvastus. Lopuksi määritetään mahdollinen riippuvuus epätasaisuusvastuksen ja päällysteen epätasaisuutta osoittavien tunnuslukujen eli indikaattoreiden välille.

**Tien epätasaisuus:** Päällysteen epätasaisuustarkastelun perusta on se, että tien päällysteen epätasaisuutta tarkastellaan mikromäkinä. Täten tasaisuutta voidaan kuvata samoin parametrein kuin tien pituuskaltevuutta. Analysoinnilla haetaan vastausta siihen, miten päällysteen tasaisuus vaikuttaa ajoneuvon vierintävastukseen.

**Kenttämittaukset:** Vierintäajomittausten tarkoituksena on määrittää ajovastuskertoimet, jotka eritellään vierintävastus- ja ilmanvastuskertoimiin.

Vierintäkokeessa ajoneuvo kiihdytetään tiettyyn alkunopeuteen (yleensä > 28 m/s, mikäli olosuhteet sen sallivat) ja annetaan sitten vieriä vaihde irrotettuna siihen asti, kunnes ajoneuvo pysähtyy tai mittausmatkan loppupää saavutetaan. Ainoat voimat, jotka vaikuttavat ajoneuvon, ovat ajovastukset.

Koska suurilla alkunopeuksilla mittausmatka ei riitä pysähdykseen saakka, toistetaan mittauksia aloittamalla seuraavat sellaisesta nopeudesta, että tietyllä nopeusalueella nopeuskäyrät yhtyvät, jolloin mittaussarjat voidaan yhdistää kuvaamaan ajoa suurimmasta alkunopeudesta pysähdykseen.

Vakioajotilamittauksissa nopeus pyrittiin pitämään vakiona koko mittausmatkan. Tarkastelu tapahtui eri vaihteilla. Tietojen talletusväli on 1 sekunti.

**Ajovastuskertoimien määrittäminen:** Ajovastuskertoimet määritettiin kantatie 54:n tieosalla 14, jota sanotaan vertailutiekseksi.

**Epätasaisuusvastusten määrittäminen:** Muilla eli koeteillä tehtiin nopeusmittaukset sekä simuloitiin vierintäkokeet, joissa käytettiin vertailutieltä saatuja vierintävastuskertoimia.

Simuloidun ja mitatun ajon nopeuserojen perusteella määritettiin päällysteen epätasaisuudesta aiheutuva epätasaisuusvastus, kuva 16.

**Epätasaisuusvastuksen ja päällysteen epätasaisuuden välinen riippuvuus:** Saatuja epätasaisuusarvoja verrataan koeteistä määritettyjen epätasaisuusindikaattoreiden arvoihin ja määritetään niiden välinen riippuvuus.

## 4.2 Ajovastusten määrittämisessä käytetty menetelmä

Vierintävastus on yksi ajovastuksista. Muita ovat tien pituuskaltevuudesta aiheutuva mäkivastus sekä ilmanvastus.

Vierintävastuksen määrittämiseen käytetään yleisesti kahta tunnettua menetelmää: nopeuden mittausta (coast down eli vierintäkoemenetelmää) ja vakioajotilan renkaan momentinmittausta /5/.

Tässä tutkimuksessa käytetään vierintäkoemenetelmää, kuten edellä todettiin. Perusteena on mm. se, että menetelmä on osoittautunut käyttökelpoiseksi ja siitä on myönteisiä kokemuksia, vrt. /9/.

Vierintäkoemenetelmän etu on se, että sen avulla saadaan määritetyksi myös ilmanvastus eli kaikki ajoneuvosimuloinnissa välttämättömät ajoneuvon ajovastukset (vierintä- ja ilmanvastukset). Ei tarvita erillisiä ajoneuvojen ilmanvastusmittauksia.

Vierintäkokeessa mitataan ajoneuvon nopeus-aikariippuvuutta ja matkaa ajoneuvon edetessä tietä pitkin vapaasti.

Vierintävastuksen kenttämittauksia on selostettu aikaisemmin luvussa 2 ja myös kohdassa 4.1.

### 4.2.1 Ajovastusten määrittäminen

Ajovastusten määrittämisessä käytetään hyväksi seuraavaa liiketilan differentiaaliyhtälöä:

$$m \frac{dv}{dt} = -mg(c_0 + q + c_1 v) - c_2 (v - u)^2$$

jossa

m	=	ajoneuvon massa	[kg]
v	=	ajoneuvon nopeus	[m/s]
t	=	aika	[s]
g	=	maan vetovoiman kiihtyvyys	[9.80665 m/s <sup>2</sup> ]
q	=	tien pituuskaltevuus	[-]
u	=	tuulen nopeus	[m/s]
c <sub>0</sub> ja c <sub>1</sub>	=	vierintävastusvakioita	[-] ja [s/m]
c <sub>2</sub>	=	ilmanvastuskerroin	[kg/m]



Lisäksi

$$c_2 = \frac{1}{2} \rho C_d A_f$$

jossa

$\rho$	=	ilman tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
$C_d$	=	muotokerroin	[-]
$A_f$	=	ajoneuvon otsapinta-ala	[m <sup>2</sup> ]

Edellä mainitun differentiaaliyhtälön ratkaisu on:

$$v = C_0 + C_1 \tan (C_2 t + C_3),$$

jossa

- $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  ja  $C_3$  ovat vakioita, jotka saadaan soveltamalla pienimmän neliösumman menetelmää eli regressioanalyysia ajan ( $t$ ) ja nopeuden ( $v$ ) havaintojoukkoon. Näistä määritetään varsinaiset vierintävastuskertoimet  $c_0$ ,  $c_1$  ja  $c_2$ .

#### 4.2.2 Koeteiden vierintäkokeiden analysointi sekä simulointi

Analysointi tehtiin kaksivaiheisesti. Ensimmäisessä vaiheessa analysoidaan yksitellen koeteiden vierintäsarjoja. Toisessa vaiheessa yhdistetään yksittäisten analysointien tulokset.

**Analysointivaihe 1:** Analysoidaan yksitellen vierintäajosarjoja, jolloin nähdään hidastuvuuserot mitatun ja vertailutien vierintävastuksiin perustuvan simuloinnin välillä.

Analysoinnin tulokset ajoneuvotyypeittäin (kuorma-auto + varsinainen perävaunu, massa 60.7 t, kuorma-auto + varsinainen perävaunu, massa 19.4 t ja henkilöauto, massa 1.6 t) nähdään seuraavissa kuvissa 16 ja 19–26.

Kuvasta 16 nähdään esimerkki kuormatun ajoneuvoyhdistelmän analysointituloksista ja samalla selostetaan kuvan antamaa informaatiota.

Kuvissa 19–22 esitetään kuormatun ajoneuvoyhdistelmän analysointitulokset koeteillä 697 ja 17519 molemmissa suunnissa. Kuvista nähdään, että eri tienkohtien (päällysteen epätasaisuuden) aiheuttama epätasaisuusvastus on sama luokkaa eri ajosarjoilla. Mikäli eri sarjojen välillä olisi suuria eroja samassa tienkohdassa, olisi menetelmä epäluotettava.

Kuvissa 23–26 esitetään henkilöauton vastaavat analyysit koeteillä 697 ja 17519. Havaitaan mm., että vierintämatkat suunnittain ovat samaa suurusluokkaa. Kuormatun ajoneuvoyhdistelmän tapauksessa suuntien välillä oli merkittävät erot vierintämatkoissa.

Analysointituloksiin liittyväksi ongelmaksi muodostuu negatiivisten epätasaisuusvastusten esiintyminen ja se, että eräissä tapauksissa vierintäsimulointi antaa pienemmän nopeuden kuin mitattu nopeus.

Todennäköinen syy ilmiöön on se, että tutkimusajankohtana käyttöön saatavissa oleva tiedonkeruujärjestelmä mahdollisti ajoneuvojen hidastuvuus- ym.



tietojen keruun vain yhden sekunnin aikavälillä. Tämä on liian suuri, koska ajoneuvot nopeudesta riippuen voivat kulkea 20–35 m/s.

Yli-ins. Olavi Koskisen mukaan liian pitkä aikaväli aiheuttaa sen, että osa vierintävastuseroista koeteiden ja vertailutien välillä muodostuu negatiiviseksi. Yhtä sekuntia lyhyempi aikaväli tiedonkeruussa mahdollistaisi epätasaisuuden täsmällisemmän tarkastelun siten, että otetaan huomioon ajoneuvon tai ajoneuvoyhdistelmän massajakauma eri akseleille ja eri pyörien paikka epätasaisella päällysteellä. Epätasaisella päällysteellä ajoneuvon etupyörä saattaa olla nousemassa kuopasta tai aallonpohjasta, mutta takapyörät tai perävaunun pyörät laskemassa toiseen kuoppaan tai aallonpohjaan.

**Analysointivaihe 2:** Tässä vaiheessa yhdistetään yksittäisten analysointien tulokset. Koska koeteiden päällysteen tasaisuus vaihteli edettäessä pitkin tietä, jaettiin - homogeenisten osien saamiseksi - kukin koetie osiin, joiden pituudeksi analysoinnissa valittiin 50 m (myös pituuksia 200, 500 ja 1 000 m tarkasteltiin)<sup>1</sup>.

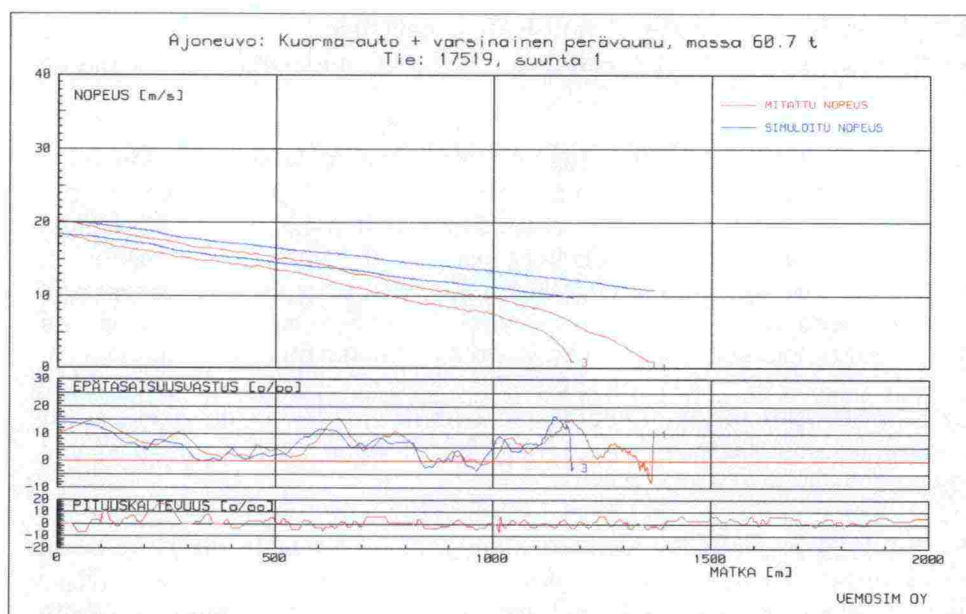
Osien pituus ratkaistaan kahden vaikutuksiltaan vastakkaisen tekijän perusteella. Nämä ovat: päällysteen tasaisuuden homogeenisuus eli epätasaisuuden mahdollisimman pieni vaihtelu tien osalla ja toisaalta havaintojen tarve ajoneuvon hidastuvuudesta ko. osalla. Mitä lyhyempi välimatka eli osan pituus, sitä homogeenisempi päällysteen tasaisuus on ko. välimatkalla, mutta tiedonkeruun aikavälillä 1 sekunti ajoneuvo saattaa nopeudesta riippuen kulkea useampia välimatkoja, jolloin ei saada havaintoa ajoneuvon hidastuvuudesta ko. osalla. Välimatkan tulee olla sellainen, että siihen sisältyisi vähintään yksi, mieluiten useampia aikavälejä, jolloin saadaan esiin hidastuvuus.

Kun ajoneuvon nopeus on ajoneuvotyyppistä riippuen vierinnän alussa 20–33 m/s, etenee esim. ajoneuvoyhdistelmä pituutensa verran sekunnissa. Tällä perusteella välimatkan minimipituudeksi valittiin 50 m, jota käytetään perusanalyysissä. Koeteiden osittaminen em. tavalla välimatkoihin merkitsee samalla havaintojen määrän kasvua merkittävästi.

Kullekin osalle määritettiin epätasaisuusvastus ja vastaavasti tien epätasaisuutta osoittavia tunnuslukuja (IRI, RMS, RMSM ja RMSR).

Tulokset on esitetty graafisesti kuvissa 29–33. Niistä nähdään, miten epätasaisuusvastus muuttuu päällysteen epätasaisuusarvon muuttuessa.

<sup>1</sup> Teoreettisesti oikeampi tarkastelu on käyttää ajoneuvon etenemää ja määrittää ajoneuvon tekemä työ tai teho aikavälietenemältä. Aikavälietenemää sovellettiin ensi, mutta vierinnän hidastuessa etenemät lyhenivät kohti arvoa 0 m. Tämän vuoksi ja siksi, että epätasaisuustiedot olivat saatavilla vain 10 m:n välein, siitä luovuttiin ja alettiin käyttää vakiopituista etenemää. Jatkotutkimuksissa tulee käyttää aikavälietenemää, varsinkin jos tiedot saadaan vähintään 1 m:n välein.



Kuva 16. Kuormatun ajoneuvoyhdistelmän vierintä tiellä 17519 suunnassa 1

#### Kuvan selitys:

Kuvan yläosasta nähdään hyvän tienpäällysteen vierintävastuskertoimien mukaisesti simuloitu nopeus (sininen) ajosarjoitain ja vastaavat mitatut nopeudet (punainen). Havaitaan, että päällysteen epätasaisuus vähentää nopeutta, varsinkin vierinnän loppuosassa, jossa nopeuserot muodostuvat suuriksi.

Kuvan alaosassa nähdään ko. koetien pituuskaltevuus, ja kuvan keskiosassa nopeuserojen perusteella määritetyt epätasaisuusvastukset pitkin koetietä. Viimemainitut kuvaavat sitä vierintävastuksen lisäystä eli epätasaisuusvastusta, jonka koetien päällysteen epätasaisuus aiheuttaa vertailutien vierintävastukseen verrattuna.

Havaitaan, että kahden eri ajosarjan epätasaisuusvastusarvot (sininen ja punainen käyrä) ovat keskenään samaa suuruusluokkaa eri tien kohdissa, vaikka nopeus ajosarjoissa on erilainen.

Eräin paikoin koetietä (kohdissa 830–860 m, noin 950–970 m ja aivan lopussa) epätasaisuusvastus muodostuu negatiiviseksi eli epätasaisuusvastuskäyrät ovat 0-tason alapuolella. Tämä osoittaa epäloogisuutta epätasaisuusvastuksen arvossa ja aiheutuneesta siitä, että ajoneuvojen liikettä koskevien tietojen keruun aikaväli 1 sekunti on liian pitkä, koska keruujärjestelmä ei mahdollistanut lyhyemmän aikavälin käyttöä.



Päällysteen epätasaisuuden tunnuslukuna käytettiin Tieliikelaitoksen mittaustietoihin perustuvia (IRI) ja Ramboll Finland Oy:n toimittamiin tietoihin perustuvia (IRI ja eri RMS:t)

Kuvasta 29 nähdään kuormatun ajoneuvoyhdistelmän ja henkilöauton vierintävastuslisäys ja IRI, kun havainnot on määritetty 50 ja 500 m:n jaksoilta koeteillä. Havaitaan, että epätasaisuuden kasvu lisää enemmän ajoneuvoyhdistelmän vierintävastusta kuin henkilöauton. Tämä perustuu siihen, että vierintävastus vaikuttaa samoin kuin pituuskaltevuus. Kun ajoneuvoyhdistelmällä massa ja akselilukumäärä ovat suuremmat kuin henkilöautolla, reagoi ajoneuvoyhdistelmä herkemmin vierintävastuksen muutokseen.

Kuvassa 30 esitetään kuormatun ajoneuvoyhdistelmän vierintävastuslisäys ja eri epätasaisuustunnusluvut 50 m:n jaksoilta koeteillä ja kuvassa 32 vastaavat henkilöauton osalta.

Kuvissa 31 ja 33 esitetään tulokset, kun epätasaisuusvastukset ja epätasaisuustunnusluvut IRI ovat kerätty 500 m:n jaksoilta. Havaitaan, että riippuvuudet epätasaisuusvastus- ja epätasaisuus- eli IRI-arvojen välillä noudattavat samaa trendiä. Hajonta pienenee samalla, kun tarkasteluosien lukumäärä pienenee tien osien pituuden kasvun mukana.

Tienpäällysteen epätasaisuustunnuslukuina on käytetty Ramboll Finland Oy:n toimittamia tunnuslukuja IRI, RMS4, RMSM ja RMSR.

Havaitaan seuraavaa:

- kun päällysteen epätasaisuutta osoittavan tunnusluvun arvo kasvaa, kasvaa ajoneuvoyhdistelmän epätasaisuusvastus herkemmin kuin henkilöautolla, kuten jo aikaisemmin todettiin; tämä pätee kaikkiin käytettyihin epätasaisuuden tunnuslukuihin
- tulosten hajonta on suurempi ajoneuvoyhdistelmällä kuin henkilöautolla
- ongelmana on paisti suuri hajonta myös negatiivisten tai lähellä arvoa 0 olevien vierintävastuserojen runsaus, ja se että suurin osa epätasaisuusarvoista on pieniä (koeteillä ei ollut riittävän huonoja päällysteitä).

Mikäli tutkimukseen sisällytettäisiin useampia kuin nyt käytetyt kolme koetietä, saataisiin pitkiä tien osiakin sovellettaessa niiden lukumäärä suureksi ja samalla esiin selkeämmät riippuvuudet sekä perusta numeerisen riippuvuuden määrittämiseen (edellyttäen, että ajoneuvojen liikettä koskeva tiedonkeruu tehdään lyhyttä aikaväliä käyttäen).



## 5 TULOKSET

### 5.1 Vierintävastuksen riippuvuus päällysteen tasaisuudesta

#### 5.1.1 Ajovastuskertoimet vertailutiellä

Vertailutiellä eli tiellä 54 tehtyjen vierintäkokeiden avulla määritettiin ajoneuvojen vierintävastus- ja ilmanvastuskertoimet hyvän ja tasaisen päällysteen perusteella, kuten kappaleissa 4.1 ja 4.2 esitettiin.

Ajoneuvoyhdistelmän tapauksessa nopeudesta riippuvan kertoimen arvo on erittäin vähäinen ja siksi on oletettu, että vierintävastuskerroin ei riipu nopeudesta. Tämän vaikutus on otettu kuitenkin analyysissä huomioon vierintävastuskertoimen vakio-osassa.

Kertoimien arvoiksi saatiin taulukon 11 mukaiset arvot. Ilmanvastuksesta ilmoitetaan tehollinen otsapinta-ala.

Taulukko 6. Ajovastuskertoimien arvot ajoneuvoittain vertailutiellä 54

Ajoneuvo	Massa	Vierintävastuskertoimet		Ilmanvastus
		Vakio	Nopeustekijä	
	[t]		[s/m]	Tehollinen otsapinta-ala (otsapinta-alan ja muotokertoimen tulo) [m <sup>2</sup> ]
Kuorma-auto + varsinainen perävanu	60.7	0.0068	0	10,98
Kuorma-auto + varsinainen perävanu	19.4	0.00750	0	9.71
Henkilöauto	1.6	0.00819	0.00032	0.58

Mainittakoon, että henkilöauton tehollinen otsapinta-ala on tehtaan mukaan 0.61, kuten ajoneuvojen ominaisuuksia koskevasta liitteestä 2 ilmenee.

### 5.1.2 Vierintävastuksen riippuvuus päällysteen epätasaisuudesta

Analyysin 1 mukaan päällysteen tasaisuus vaihtelee koeteillä tien kohdan mukaan ja vastaavasti vaihtelee ajoneuvon vierintävastuksen lisäys, ks. kuvat 16 sekä 19–26.

Analyysin 2 mukaan saatiin tulokset, jotka ilmenevät kuvista 29–33.

Kuvassa 29 nähdään 50 ja 500 m:n jaksoilta määritetyn IRI:n vaikutus ajoneuvoyhdistelmän ja henkilöauton epätasaisuusvastukseen.

Kuvassa 30 nähdään 50 m:n jaksoilta määritettyjen IRI:n, RMS4:n, RMSM:n ja RMSR:n vaikutukset ajoneuvoyhdistelmän epätasaisuusvastukseen ja kuvassa 33 vastaava henkilöauton osalta.

Kun tarkasteluväliä eli jaksoa, jolta havaintojen arvot määritetään, pidennetään, vähenee havaintojen lukumäärä, mutta epätasaisuusvastuksen ja päällysteen epätasaisuuden välinen riippuvuus tulee selkeämmäksi. Tämä ilmenee kuvista 31 ja 33, joissa jakson pituus on 500m.

Tuloksista voidaan tehdä seuraavat päätelmät:

- Ajoneuvon epätasaisuusvastus kasvaa selvästi tienpäällysteen epätasaisuuden lisääntyessä.
- Pidennettäessä tarkasteluväliä havaintojen lukumäärä vähenee, mutta hajonta pienenee ja epätasaisuusvastuksen ja päällysteen epätasaisuuden välinen riippuvuus tulee selkeämmäksi.

Tuloksissa havaittiin kuitenkin seuraavat ongelmat, kuten analysoinnin yhteydessä (kappale 4.2.2) jo todettiin:

- epätasaisuusvastus vaihtelee suuresti ja päällysteen tasaisuutta koskevan tunnusluvun tiettyä arvoa vastaa monta arvoltaan erilaista vierintävastuksen lisäystä.
- merkittävä osa epätasaisuusvastuksista saa negatiivisen arvon. pääasiassa suunnassa, jossa tien kaltevuus on pienempi kuin 0 % (myötämäki). Epätasaisuusvastuksen negatiivinen arvo ei ole loogisesti järkevä, ellei oteta huomioon, että ajoneuvon jotkin pyörät ovat "myötämäessä" epätasaisella päällysteellä
- suurin osa päällysteen epätasaisuusarvoista on pieniä, koska koeteillä ei ollut riittävän huonoja päällysteitä; osa koeteiden tienkohdista oli tasaisuudeltaan samaa luokkaa ja eräissä kohdin jopa parempaa kuin vertailutie.

Kahden ensin mainitun ongelman vuoksi ja siksi, että käytetyn epätasaisuuden tunnusluvun IRI määrittämisperusteiden ja ajoneuvodynamiikan välillä ei ole fysikaalista perustetta, päädyttiin siihen, että tässä vaiheessa ei määritetä numeerista riippuvuutta epätasaisuusvastuksen ja päällysteen epätasaisuutta osoittavien tunnuslukujen välille. Tulokset olisivat tulleet virheellisiksi.

### 5.1.3 Syyt tuloksissa ilmenneisiin ongelmiin ja niiden mahdollinen tuleva ratkaisu

Yli-ins. Olavi H. Koskisen käsityksen mukaan kahteen ensin mainittuun ongelmaan (suuri hajonta ja negatiiviset epätasaisuusvastukset) on olemassa syyt, jotka aiheutuvat tietojen keruun aikavälistä. Yhden sekunnin aikaväli on liian pitkä ajoneuvon hidastuvuuden ja edelleen epätasaisuusvastuksen määrittämiseen. Sekuntia lyhyempi aikaväli (0.1–0.2 s) pienentäisi tulosten hajontaa ja poistaisi tai todennäköisesti vähentäisi epätasaisuuden negatiivisia arvoja.

Lyhyt aikaväli tiedonkeruussa mahdollistaisi epätasaisuuden vaikutuksen nykyistä täsmällisemmän tarkastelun ajoneuvon tai ajoneuvoyhdistelmän vierintävastukseen. Voitaisiin tarkastella ajoneuvojen massajakautumaa eri akselille ja eri pyörien paikkaa ajon aikana sekä kytkeä paikat päällysteen epätasaisuuteen tietä edettäessä.

Olavi H. Koskisen mukaan myös päällysteen epätasaisuuden nykyiset tunnusluvut (erityisesti IRI osoittaessaan keskiarvoa) eivät ole sopivia selittämään ajoneuvodynamiikkaa ja samalla epätasaisuusvastusta.

Myös Anssi Lampinen epäilee IRI:n käyttökelpoisuutta yleensä ja hän ehdottaakin uuden tunnusluvun kehittämistä, kts. tarkemmin tämän raportin luku 6.

Kolmas ongelma, joka koskee hyvien epätasaisuusarvojen runsautta tutkimuksessa, voitaisiin ratkaista vain, mikäli koeteiksi löydettäisiin päällysteen tasaisuuden osalta riittävän huonoja teitä.

### 5.1.4 Tuulen nopeuden vaikutus

Kenttämittauksissa, joiden aikana sää oli tyyntä, ei ollut käytettävissä tuulimittaria, joten tuulen nopeuksista ei ole tietoa.

Jotta saataisiin käsitys tuulen nopeuden ja suunnan vaikutuksista, analysoitiin muutamia ajoja käyttämällä vierintäkokeiden simuloinnissa tuulennopeuden oletusarvoina -3 (vastatuuli), 0 ja 3 m/s (on myötätuuli).

Kuvista 27 ja 28 nähdään, että tuuli vaikuttaa kevyen eli henkilöauton nopeuteen ja vastaavasti analysoituun epätasaisuusvastuksen arvoon, mutta kuormatulla ajoneuvolla hiukan nopeuteen, muttei juurikaan epätasaisuusvastuksen arvoon.

Ajovastuskertoimien määrittämistä varten kokeet tulisi tehdä tyynellä säällä.

## 5.2 Arvio päällysteen tasaisuuden heikkenemisen vaikutuksesta

Suunnitelman mukaan oli tarkoitus käsitellä päällysteen epätasaisuuden vaikutusta ajoneuvojen polttoaineenkulutukseen ja ajoneuvokustannuksiin tutkimuksesta saatavien tulosten perusteella.



Asian käsittelystä luovuttiin, koska ei saatu määritettyä numeerisia riippuvuuksia vierintävastuksen ja päällysteen epätasaisuuden välille, kuten edellä todettiin.

Asiaa käsitellään kuitenkin vaihtoehtoisella tavalla tekemällä suuruusluokka-arvio, kuinka paljon päällysteen tasaisuuden heikkeneminen lisäisi liikenteen polttoaineenkulutusta ja -kustannuksia päällystettyjen valta-, kanta- ja seututeiden osalta. Tarkastelu tehdään käyttäen hyväksi ajoneuvosimulointimenetelmää ja kirjallisuustutkimuksen tietoa, paljonko päällysteen tasaisuuden heikkeneminen lisää ajoneuvojen vierintävastusta.

Arviossa käytetään seuraavia perusteita:

- tämän raportin luvun 2 kappaleissa 2.2 ja 2.3 esitettyjä tietoja polttoaineenkulutuksen (ja myös päästöjen) ja vierintävastuksen keskinäisestä riippuvuudesta ajoneuvotyyppin mukaan.
- tämän raportin luvussa 6 Lampisen esittämiä ulkomaisia tutkimustuloksia koskien vierintävastuksen ja päällysteen epätasaisuuden välistä riippuvuutta ajoneuvotyyppin mukaan
- ajoneuvosimulointimenetelmää ja
- liikennesuoritetietoja valta-, kanta- ja seututeillä v. 2003.

Arvion vaiheet ilmenevät liitteenä olevan taulukon 10 kohdista a) – c) ja tulokset kohdista d) ja e).

Havaitaan, että päällysteen kunnon heikkeneminen

- arvosta IRI=1 arvoon IRI=2 lisää verollisia polttoainekustannuksia valta-, kanta- ja seututeillä noin 28 milj. € vuodessa ja
- arvosta IRI=1 arvoon IRI=4 lisää verollisia polttoainekustannuksia valta-, kanta- ja seututeillä noin 81 milj. € vuodessa.

## 6 VERTAILU MUUALLA TEHTYIHIN TUTKIMUKSIIN

Tässä luvussa esitetään Anssi Lampisen, AL Engineering Oy, tekemän kirjallisuustutkimuksen tulokset ja tämän jälkeen sen ja käsillä olevan tutkimuksen antamien tulosten vertailu.

### 6.1 Kirjallisuustutkimuksen tulokset

Kirjallisuustutkimus "Tien pituussuuntaisen epätasaisuuden vaikutus ajoneuvojen vierintävastukseen ja polttoainekustannuksiin" /10/ antaa hyvän käsityksen pääasiassa ulkomailla tehdyistä alan tutkimuksista ja niiden tuloksista sekä sisältää A. Lampisen ehdotuksen toimenpiteistä.

#### 6.1.1 Hajahuomiota tutkimuksen sisällöstä

##### Tutkimuksissa käytetyt ajoneuvotyypit

Ulkomaisissa tutkimuksissa on selvitetty päällysteen epätasaisuuden vaikutusta pääasiassa henkilöautojen vierintävastuksiin ja vähäiseltä osin kuorma-autojen vierintävastuksiin.

Ongelmana on se, että kirjallisuustutkimuksesta ei ilmene ajoneuvojen teknisiä ominaisuuksia, jotka kuorma-autojen osalta ovat tärkeitä tietää, mikäli saatuja tuloksia halutaan soveltaa Suomen olosuhteisiin.

On todennäköistä, että ulkomaisissa kuorma-autoja koskevissa tutkimuksissa on käytetty Suomen mittapuun mukaan keskikokoisia tai pienehköjä kuorma-autoja.

##### Epätasaisuuden vaikutusta tutkittaessa käytetyt menetelmät

Lampinen toteaa -laboratoriomittausten ohella (, jotka eivät tosin sovellu vierintävastusmittauksiin) - mm. seuraavat kolme menetelmää tiellä tehtävissä mittauksissa:

**Instrumentoitu ajoneuvo tai perävaunu:** ajoneuvoon on asennettu mittauslaitteet, joiden avulla vierintävastus mitataan voimana tai vääntönä ajoneuvon pyörältä, akselilta tai kardanilta.

**Coast-down- eli vierintäkoemenetelmä:** Annetaan ajoneuvon vieriä alku-nopeudesta pysähdykseen asti epätasaisuudeltaan erilaisilla päällysteillä ja mitataan ajoneuvon hidastuvuutta (nopeutta). Tiedoista (nopeus/aika-tiedoista) lasketaan ajovastukset (ja eritellään vierintävastus ja ilmanvastus).

**Dynamometrin avulla tapahtuva mittaus (ajoneuvo tai perävaunu):** Vedettävä laite, jossa on rengas ("neljännesajoneuvo"). Mitataan renkaaseen ("neljännesajoneuvoon") kohdistuvia voimia ja lasketaan vierintävastus voimien perusteella. Menetelmä on kompromissi laboratorio- ja kenttämittausten välillä.

### 6.1.2 Kirjallisuustutkimuksen ”Johtopäätökset ja suositukset”

Lampinen toteaa seuraavaa:

**Päällysteen pinnan kuvaaminen ja mittaaminen:** Nykyisin maassamme käytettävät tunnusluvut ovat: tasaisuuden osalta IRI ja pinnan karkeuden osalta RMS:t sekä muina tunnuslukuina MPD- ja MTD-arvot.

IRI ilmoittaa keskiarvon tietyn mittausosan matkalle. Sama IRI-arvo voidaan saada ominaisuuksiltaan (päällysteen tasaisuuden osalta) hyvin erilaisille tieosille.

Lampinen ehdottaa päällysteen tasaisuuden tunnusluvuksi PSD:ta (Power Spectral Density), joka hänen käsityksen mukaan antaa lähes yksikäsitteisen kuvan tien pituussuuntaisen epätasaisuuden koostumuksesta (osoittaa, koostuuko epätasaisuus pitkien vai lyhyiden aaltojen vaikutuksista). Hyvänä puolena Lampinen mainitsee, että PSD:n mittaamiseen voidaan käyttää olemassa olevia PTM-autoja.

**Vierintävastuksen taloudelliset vaikutukset:** Vierintävastuksen osuus kokonaisenergian kulutuksesta on 20–30 %. Vierintävastuksen ja polttoaineen kulutuksen välillä on seuraava yhteys: vierintävastuksen 10 %:n muutos vastaa polttoaineenkulutuksen muutoksessa 1–4 %, keskiarvo henkilöautoille on 2 % ja kuorma-autoille 2.5 %.

Vierintävastuksen pienentäminen 1 % vähentää polttoaineenkulutusta 0.2–0.25 %. Tästä aiheutuva kustannusten vähentyminen vuodessa olisi Lampisen mukaan maassamme tällä hetkellä raskailla ajoneuvoilla 1.2/2.8 M€ (veroton/verollinen) ja henkilöautoilla vastaavasti 1/3.4 M€. Vierintävastuksen pienentäminen vaikuttaa hieman edullisemmin raskaaseen liikenteeseen kuin henkilöautoliikenteeseen.

**Vierintävastus ja päällysteen pituusprofiili:** Tutkimuksessa päällysteen pituusprofiililla tarkoitetaan mikro-, makro- ja megakarkeutta sekä epätasaisuutta (IRI), taulukko 7.

Taulukko 7. Eri karkeuslajien ja epätasaisuuden osuudet vierintävastuksesta

Tekijä	Aallonpituusalue	Vaikutusosuus vierintävastukseen [%]	Eräät muut ominaisuudet, joihin tekijällä myös vaikutusta
Mikrokarkeus	0–0.5 mm	2–3	Kitka
Makrokarkeus	0.5–50 mm	10	
Megakarkeus	50–500 mm	12	Jousituksen tekemä työ
Epätasaisuus	0.5–50 m, joka jaetaan osiin: – 0.5–3 m (lyhyet) – 3–10 m (keskipitkä) – 10–40 m (pitkät) ja – 0.5–4 m (= IRI4)	10	Ajomukavuus



**Päällystetekijöiden vaikutuspotentiaali Suomessa:** Lampinen toteaa aluksi, että Suomessa päällysteiden laatu on yleensä "hyvä" ja siksi sen parantaminen ei mahdollista sitä hyötyä, joka ulkomaisissa tutkimuksissa on todettu saatavan päällysteiden laadun parantamisella.

Tiedostaen nastarenkaiden käytön ja vaikutuksen päällysteisiin Lampinen antaa valistuneena arvauksenaan päällysteiden karkeuden vaikutusosuudesta polttoaineen kulutuslisäykseen 4–5 %.

Epätasaisuuden (IRIn) vaikutus henkilöautojen vierintävastukseen on keskimäärin 4 %/IRI-yksikkö ja raskaiden ajoneuvojen vierintävastukseen 2.5 %/IRI-yksikkö. Polttoaineenkulutukseen vastaavat vaikutukset ovat henkilöautolla 0.8 %/IRI-yksikkö ja raskailla ajoneuvoilla 0.5 %/IRI-yksikkö.

Yhteenvetona Lampinen arvioi, että vierintävastuksen pienentämistoimenpiteiden potentiaalinen vähentämismahdollisuus on 6–10 % Suomen olosuhteissa.

**Kantavuuden vaikutus vierintävastukseen:** Lampinen viittaa eräisiin teoreettisiin laskelmiin ja vertailumittauksiin, joiden mukaan asfalttipäällysteellä polttoaineenkulutus on noin 10 % suurempi kuin betonipäällysteellä. Hän toteaa, että päällysteen jäykkyydellä on merkitystä vain raskaiden ajoneuvojen vierintävastukseen (koska rengas "painuu" joustavaan tai pehmeään päällysteeseen).

#### **Lampisen suositus mittausmenetelmistä ja laskettavista suureista:**

Pituusprofiilimittaus: Tulee tehdä mahdollisimman suurella mittaustiheydellä, käytännössä 1–2 mm mittaustiheydellä.

#### Laskettavat suureet ja niiden käyttötarkoitus:

- IRI ja IR4 vierintävastuskertoimen laskentaan
- Makro- ja megakarkeus, jotka esitetään tunnusluvuilla RMS (0.5–50 mm) ja RMS (50–500 mm) karkeusvaikutuksen arvioinnissa vierintävastusta laskettaessa
- PSD-spektri, joka tarjoaa parhaan lähtökohdan arvioitaessa päällysteen epätasaisuuden koostumuksen - aallonpituus ja amplitudi - vaikutusta
- Sivu- ja pituuskaltevuus: kaltevuuden mittaamisessa riittää 1–5 m:n keskiarvo ja tätä käytetään laskettaessa tiegeometrian kokonaisvaikutuksia ajoneuvoon
- Kantavuusmittaustieto tierekisteristä: kantavuudella on vaikutusta vierintävastukseen

## **6.2 Vertailu ulkomaisten ja suomalaisten tutkimustulosten kesken**

Vertailu rajataan koskemaan kahta seikkaa, nimittäin

- tuloksia, jotka koskevat vierintävastuksen lisäyksen aiheuttamaa muutosta ajoneuvojen polttoaineenkulutuksen lisäykseen, ja
- vierintäkoemenetelmän käyttöä vierintävastuskertoimien määrittämisessä

Vertailua vaille jätetään se, miten paljon päällysteen epätasaisuuden lisäys kasvattaa ajoneuvojen vierintävastusta. Syy tähän on se, että tässä tutkimuksessa (= suomalainen tutkimus) ei luotu numeerista riippuvuutta päällysteen epätasaisuusvastuksen ja ajoneuvojen vierintävastuksen välille lähtötietojen epätarkkuuden vuoksi.

### 6.2.1 Merkittävä ero vierintävastuslisäyksen aiheuttamassa polttoaineenkulutuksessa

Suomalaisen, ajoneuvosimulointiin perustuvan selvityksen ja ulkomaisten tutkimusten antamien tulosten kesken on olennainen ja merkittävä ero, joka ilmenee alla olevasta asetelmasta.

#### 10 %:n vierintävastusmuutoksen aiheuttama polttoaineenkulutusmuutos

Tutkimus	Polttoaineenkulutusmuutos
<b>Ulkomaiset tutkimukset (Lampinen /10/)</b>	[%]
- henkilöauto	2
- raskas auto (ei tietoa ominaisuuksista eikä massasta)	2.5
<b>Suomalainen ajoneuvosimulointitutkimus</b>	[%]
- henkilöauto	1.8 – 3.8
- ajoneuvoyhdistelmä	
o kuormattu, massa 60 t	5.8 – 6.6
o osakuormattu, massa 40 t	4.8 – 6.6
o kuormaamaton, massa 20 t	3.1 – 5.0

Mikäli käytettäisiin perustana ajoneuvosimuloinnin antamia tuloksia ulkomaisten tutkimustulosten sijasta ja tehtäisiin selvitys päällysteen tasaisuuden heikkenemisen aiheuttamista lisäkustannuksista, saataisiin ilmeisesti huomattavasti suurempi arvo kuin mitä on A. Lampisen esittämä n. 6 M€ per vuosi. Tähän viittaa kohdassa 5.2 tehty suuruusluokkalaskelma päällystettyjen valta-, kanta- ja seututeiden osalta.

### 6.2.2 Vierintäkoemenetelmän käyttö vierintävastuskertoimien määrittämisessä

Lampinen, viitaten tekemäänsä kirjallisuustutkimukseen /10/, toteaa, että dynamometrin avulla tapahtuva mittaus on "ylivoimainen muihin menetelmiin, mm. coast-down-menetelmään verrattuna", kun määritetään ajoneuvon vierintävastusta.

Tässä käsillä olevassa tutkimuksessa on kuitenkin osoitettu, että vierintäkoemenetelmän (coast-down-menetelmä) avulla voidaan määrittää ajoneuvojen vierintävastus ja epätasaisuudesta aiheutuva vierintävastuksen lisäys.

Tosin käsillä olevassa tutkimuksessa, joka muodostui lähtötietojen epätarkkuuden vuoksi esitutkimukseksi, ei määritetty numeerista riippuvuutta epätasaisuuden ja vierintävastuksen lisäyksen välille. Kuitenkin osoitettiin graafis-



ta analyysia käyttäen, että päällysteen epätasaisuuden kasvaessa lisääntyy vierintävastus selvästi.

Vierintäkoemenetelmän lisäetu on se, että ko. menetelmän avulla voidaan määrittää samalla kaikki ajovastuskertoimet, ts. paitsi vierintävastus- myös ilmanvastuskertoimet.

Vierintävastus- ja ilmanvastuskertoimet ovat välttämättömiä, kun ajoneuvosimulointimenetelmää käytetään vierintävastuksen muutoksesta aiheutuvien vaikutusten, so. polttoaineenkulutuksen ja päästöjen määrittämisessä.

Vierintäkoemenetelmän käyttöön liittyy seuraavat ongelmat (, jotka tässä tutkimuksessa kuitenkin pystyttiin ratkaisemaan):

- menetelmällä saadaan kokonaisajovastus, mutta sen jakaminen osiin saadaan osatekijöiden arvojen erilaisilla kombinaatioilla. Siksi niiden käsittely analysointivaiheessa edellyttää hyvää tietämystä ja kokemusta
- kenttämittausten aikana tuulinen sää voi aiheuttaa virhettä lähinnä kevyiden ajoneuvojen osalta, koska niillä pienen massan ja suuren nopeuden vuoksi ilmanvastuksen osuus ajovastuksista on suuri.

Tuuliongelmia voidaan vähentää tekemällä vierintäkokeet tyynellä säällä.

### 6.2.3 Muita vierintävastustutkimuksiin liittyviä seikkoja

Italialaisten tutkimusten mukaan vierintävastus voi tiellä, jossa lumipaksuus on 5 cm nousta arvoon 0.025 ja lumipaksuudella 10 cm arvoon 0.037 /8/.

Saman italialaisen lähteen /8/ mukaan vierintävastus voi päällystämättömällä luonnon tiellä saada arvoja 0.080–0.160 ja hiekassa arvoja 0.150–0.300.

Italialaislähteen mukaiset arvot tuntuvat suurilta, sillä simulointien mukaan polttoaineenkulutus nousee vierintävastuksen arvolla 0.10 henkilöautolla lähes 3-kertaiseksi ja kuormatulla ajoneuvoyhdistelmällä lähes kymmenkertaiseksi. Täysin kuormattu ajoneuvoyhdistelmä (massa 60 t) liikkuu vain ryömintävaihteella (5–7 km/h) simuloinnin mukaan, kun vierintävastuskerroin kasvaa arvoon 0.15.

*Suositus:* Saattaisi olla hyödyllistä hankkia suomalaisia oloja vastaavaa tietoa mm. lumenpaksuuden ja jääpolanteiden samoin kuin kelirikon vaikutuksesta vierintävastuksiin. Perusteena on se, että lumi on pitkäaikainen tekijä Suomen teillä talvisin, varsinkin pohjoisemmillä alueilla, ja kelirikko vaivaa teitämme syksyisin ja keväisin. Lisäperusteena on se, että simulointimenetely mahdollistaisi näin saatujen vierintävastustietojen käytön monipuolisesti geometrialtaan erilaisilla teillä polttoaineenkulutuksen, päästöjen sekä ajoneuvo- ja aikakustannusten määrittämiseen.



## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

### 7.1 Johtopäätökset

1. Tutkimuksessa käytetty vierintäkokeisiin perustuva menetelmä yhdessä ajoneuvodynamiikkaan perustuvan simuloinnin kanssa näyttää soveltuvan tienpäällysteen epätasaisuudesta aiheutuvan vierintävastuksen määrittämiseen edellyttäen, että tietiedot ovat luotettavia ja riittävän tarkkoja ja ajoneuvon hidastuvuutta koskevat tiedot kerätään lyhyin aikavälein.
2. Vierintäkoemenetelmän lisäetu on, että sen avulla saadaan määritettyä myös ilmanvastus eli kaikki ajoneuvosimuloinnissa välttämättömät ajoneuvon ajovastukset (vierintä- ja ilmanvastukset).
3. Teiden päällysteiden tasaisuusmittausjärjestelmä (PTM-järjestelmä) yhdessä em. ajoneuvodynamiikkaan perustuvan simuloinnin kanssa mahdollistaa tasaisuuden vaikutusten määrittämisen edellyttäen, että tien pituuskaltevuuden määrittämiseen käytettävä korkeusmittaus tai vaihtoehtoisesti suora pituuskaltevuusmittaus tehdään luotettavaksi ja tarkaksi.
4. Tutkimuksen mukaan ajoneuvojen vierintävastus riippuu selvästi tien päällysteen epätasaisuudesta. Numeerista riippuvuutta ei kuitenkaan määritetty lähtötietojen epätarkkuuden vuoksi, koska tuloksiin tulisi liian suuri hajonta ja niissä on eräiltä osin epäloogisuutta.
5. Tulosten hajonta ja osittainen epäloogisuus aiheutunevat siitä,
  - että koeteiden päällysteet eivät olleet riittävän huonoja (pienien epätasaisuusarvojen osuus on suuri); osa koeteiden tienkohdista oli tasaisuudeltaan samaa luokkaa ja eräissä kohdin jopa parempaa kuin vertailutie
  - että vierintävastuksen määrittämiseen käytettyjen tietojen keruuseen oli tarjolla liian pitkällä aikavälillä (1 sekunti) toimiva tiedonkeruujärjestelmä, ja mahdollisesti siitä,
  - että päällysteen epätasaisuuden nykyiset tunnusluvut eivät ehkä ole sopivia.
6. Yhtä sekuntia lyhyempi aikaväli tiedonkeruussa mahdollistaisi epätasaisuuden vaikutuksen nykyistä täsmällisemmän tarkastelun ajoneuvon tai ajoneuvoyhdistelmän epätasaisuusvastukseen. Ajoneuvossa tai ajoneuvoyhdistelmässä massa jakautuu eri akseleille ja voitaisiin tarkastella ajoneuvojen eri pyörien paikkaa ajon aikana ja kytkeä paikat päällysteen epätasaisuuteen tietä edettäessä.
7. Ajoneuvodynamiikkaan perustuva simulointimenetelmä, jonka oikeellisuus mm. polttoaineenkulutuksen osalta on todennettu /11 ja 12/, osoittaa, että vierintävastuksen lisäyksen aiheuttama polttoaineenkulutuksen kasvu on merkittävästi suurempi kuin ulkomaisissa tutkimuksissa on todettu. Tosin ei ole tietoa, millaisista raskaista ajoneuvoista ulkomaisissa tutkimuksissa on kysymys.
8. Suomessa käytettävillä raskailla ajoneuvoyhdistelmillä vierintävastuksen kasvu lisää polttoaineenkulutusta noin 2-kertaisesti verrattuna ulkomais-

ten tutkimusten arvoihin. Myös henkilöauton vastaavat arvot ovat suomalaisen menetelmän mukaan hiukan korkeampia ulkomaisten tutkimusten tuloksiin verrattuna.

Tämä merkitsee sitä, että päällysteen epätasaisuudesta aiheutuvat suuremmat polttoaineenkulutukset, päästömäärät pääsääntöisesti sekä kustannukset kuin ulkomaiset tutkimukset osoittavat.

9. Tutkimuksen kuluessa selkeytyi käsitys myös epätasaisuuden muista vaikutuksista, joita ei selvitetty, mutta joilla on merkitystä. Näitä ovat:
- päällysteen epätasaisuus lisätessään ajoneuvon ja sen osien tärinää ja heilahtelua, aiheuttaa ajoneuvon ja sen osien lisäkulumista, rikkoutumista ja pitoajan lyhentymistä sekä lisäkustannuksia
  - tärinä ja heilahtelu heikentävät ajomukavuutta ja voivat lisätä tavaran rikkoutumisriskiä.
  - päällysteen epätasaisuuden ollessa suuri, se saattaa aiheuttaa ajonopeuden vaihtelua, mikä lisää polttoaineenkulutusta, päästöjä ja ajoneuvokustannuksia sekä myös ajoaikaa ja aikakustannuksia.
  - päällysteen epätasaisuus sekä sopimaton tiegeometria (tien poikittais- ja pituuskaltevuus sekä vaaka- ja pystykaarre) yhdessä liukkaan kelin kanssa lisäävät onnettomuusriskiä, ja aiheuttanevat jopa vakavia onnettomuuksia.

## 7.2 Suositukset

### Tietojen keruuta kehitettävä edelleen

Vierintäkokeet tulee tehdä siten, että tietojen keruuväli on mahdollisimman pieni (1/5 sekuntia tai sitä lyhyempi).

Tietiedot tulee kerätä siten, että saadaan määritettyä tien pituussuunnassa sekä tien pituuskaltevuus (= makrokaltevuus) että myös päällysteen pituuskaltevuus (= mikrokaltevuus). Vain täten voidaan määrittää päällysteen epätasaisuuden vaikutus ajoneuvon liiketilaan ja energiankulutukseen fysiikan lakien (ajoneuvodynamiikan) mukaisesti.

### Uusi tunnusluku tarpeen päällysteen epätasaisuuden mittaamiseksi

Epätasaisuudelle tulee kehittää uusi tunnusluku, koska esim. IRI, osoittaessaan epätasaisuuden keskiarvon matkayksikköä kohden, ei ole sopiva.

Uuden tunnusluvun tulee

- olla kuvaava eli ottaa huomioon epätasaisuuden amplitudi ja aallonpituus
- olla käyttökelpoinen eri tarkoituksiin eli osoittaa epätasaisuuden vaikutus ajoneuvodynamiikkaan
  - energiankulutuksen kannalta
  - pyörien vertikaalinen radiaalkiihtyvyyden ja siten normaalivoiman vaihtelun kannalta (liikenneturvallisuuden kannalta) sekä lisäksi
  - ajomukavuuden kannalta

### **Vierintävastuksen jatkotutkimuksissa käytettävä tarkkaa tiedonkeruuta**

Mahdolliset jatkotutkimukset ajovastusten määrittämiseksi tulisi tehdä ottaen huomioon ainakin edellä esitetty tiedonkeruun kehittäminen. Samalla saataisiin lisätietoa myös päällysteen tasaisuustunnusluvun kehittämiseksi.

Jatkotutkimukset nyt kehitettyä menetelmää käyttäen voisivat koskea myös huonon kelin (esim. kelirikko, lumi, sohjo tai jääpolanne) vaikutuksia vierintävastukseen, polttoaineenkulutukseen ja ajokustannuksiin.



## 8 LÄHDELUETTELO

- /1/ Olavi H. Koskinen, 2003-09-27, Tiestön laadun vaikutus kuljetusten polttoainetalouteen ja ympäristöhaittoihin, SKAL/Metsäalan seminaari, Rauhalampi, Kuopio, 2003.
- /2/ Road Surface Condition Indicators from Laser RST, As used in Finland, 2003-12-07
- /3/ Koetiemittausten tietiedot, Ramboll Finland Oy, 14.09.2003 ja 13.11.2003
- /4/ Tietilasto 2002, Tilastoja 1/2003, Tiehallinto, Helsinki 2003.
- /5/ Cenek D. Peter, Rolling Resistance Characteristics of New Zealand Road Surfaces, in Vehicle –Road Interaction, Bohlan T. Kulakowski, Editor, ASTM. Philadelphia, USA, 1994.
- /6/ Olavi H. Koskinen (1998). VEHICLE SIMULATOR, Helsinki, Finland, (revised), unpublished memorandum.
- /7/ Päällystetyn tien tasaisuuden mittauksesta, SCC Scandiaconsult ja Tiehallinto, Suomenkielinen versio, Helsinki 22.8.2003.
- /8/ Genta Giancarlo, Motor Vehicle Dynamics, Modelling and Simulation, World Scientific, Singapore, 1998.
- /9/ Mercedes-Benz 0 303 Turbo Delta Express, Analysis of drive resistance, performance, fuel consumption, Olavi H. Koskinen, Ministry of Communications, Helsinki, Finland, February 1985.
- /10/ Tien pituussuuntaisen epätasaisuuden vaikutus ajoneuvojen vierintävastukseen ja polttoainekustannuksiin, tutkimusraporttiluonnos, A. Lampinen AL Engineering Oy, Helsinki, 2004.
- /11/ Sauna-aho Pasi. Raakapuunkuljetusten energiankulutuksen ja päästöjen määrittäminen Vemosim-ajoneuvosimulaattorilla. Jyväskylän Ammattikorkeakoulu, 2003.
- /12/ Olavi H. Koskinen and Jussi Sauna-aho. VEHICLE MOTION SIMULATION – An Efficient Tool for Energy and Emission Analysis, The 9th CRC On-road Vehicle Emissions Workshop, April 19–21, 1999, San Diego, Ca.

## 9 LIITTEET

## SELVITYKSESSÄ KÄYTETYT KÄSITTEET JA TERMIT

### Tien pituuskaltevuus

Tien kahden pisteen korkeusero jaettuna matkaerolla pisteiden lähestyessä toisiaan (vrt. funktion derivaatta). Yksikkö: [%] tai absoluuttisyksikkö

Tien pituuskaltevuudella on keskeinen merkitys kaikkien ajoneuvon liiketilaan sekä sitä kautta polttoaineenkulutukseen ja päästöihin sekä lisäksi nopeuteen, erityisesti raskailla ajoneuvoilla.

### Tien päällysteen tasaisuus

Tien pituussuuntainen tai poikittaissuuntainen tasaisuus  
Päällysteen tasaisuudella on useita vaikutuksia, kts. alla.

### Tien päällysteen pituussuuntainen tasaisuus

Tien päällysteen pituussuuntaisella tasaisuudella tarkoitetaan tien pituussuuntaisesta profiilista laskettua profiilin vaihtelua aallonpituusalueella 0.5–50 m.

Tasaisuus ilmoitetaan erilaisina tunnuslukukuina, joista yleinen on IRI (International Roughness Index)

Päällysteen tasaisuus vaikuttaa ajoneuvon vierintävastukseen ja renkaiden radiaalikiihtyvyyteen sekä synnyttää ajoneuvon tai sen osien tärinää ja heilahtelua riippuen tasaisuuden arvosta ja ajonopeudesta. Näiden kautta syntyy rikkoutumisriskiä ja vaikutuksia ajoneuvon korjaus- ja huoltokustannuksiin ja pitoaikaan, polttoaineenkulutukseen ja päästöihin, ajoepämukavuuteen, tavaravaurioitumisriskiin ja jopa onnettomuusriskiin sekä ajoaikaan tasaisuuden arvosta ja nopeudesta riippuen.

### Tien päällysteen poikittaissuuntainen tasaisuus

Tien päällysteen poikittaissuuntaisella tasaisuudella tarkoitetaan tien poikittaissuuntaisesta profiilista laskettua profiilin vaihtelua.

Tasaisuus ilmoitetaan erilaisilla tunnusluvuilla, kuten poikittaisskaltevuus.

Poikittaissuuntainen epätasaisuus voi aiheuttaa ajoneuvon kallistelua, jopa kaatumisen tai liukkaudesta riippuen tieltä suistumisen ja siten onnettomuusriskiä.

### IRI-epätasaisuus

IRI (International Roughness Index) on Maailmanpankin kehittämä ja käytämä tasaisuustunnusluku.

IRI määritellään ja määritetään erään ajoneuvon jousen amplitudimuutoksen summana matkayksikköä kohden [mm/m].

IRI kuvaa tienpinnan epätasaisuuden vaikutusta sen yli kulkevan ajoneuvon ja tienkäyttäjään.

### IRI4-epätasaisuus

IRI4 on IRI:n perusteella määritetty, muutettu tunnusluku, joka ottaa huomioon vain 4 m lyhyemmät aallonpituudet [mm/m]

### RMS-epätasaisuus

RMS on päällysteen pituussuuntaisen epätasaisuuden tunnusluku (Root Mean Square).



RMS-arvot lasketaan eri välimatkoille seuraavasti:

- RMS1: 0.5–1 m
- RMS2: 1–3 m
- RMS3: 3–10 m
- RMS4: 10–30 m

RMS-arvot määritetään keskiarvoina valituille mittausväleille, joina käytetään 10, 20, 100 tai 400 m ja yksikkönä on [mm/100 m tai mm/valittu välimatka].

RMS1–4 vaikuttavat renkaan vierintävastukseen sekä ajomukavuuteen että ajoneuvojen ja niiden osien kulumiseen tai rikkoutumiseen.

#### **RMSF-hienokarkeus**

Tasaisuuden tunnusluku määritettynä aallonpituusalueelta 1 mm–10 mm.

Vaikuttaa renkaan ja tien väliseen kitkaan (pitoon).

#### **RMSR-makrokarkeus**

Tasaisuuden tunnusluku määritettynä aallonpituusalueelta 10 mm–100 mm. (Huom.! Edellä mainittu on lähteen /2/ mukainen määrittely Suomea varten, mutta ISO-standardin 13473-1 mukaan makrokarkeus määritetään aallonpituusalueelta 0.5 mm–100 mm).

Vaikuttaa renkaan ja tien väliseen kitkaan (pitoon), mutta osittain myös meluun ja vierintävastukseen.

#### **RMSM-megakarkeus**

Tasaisuuden tunnusluku määritettynä aallonpituusalueelta 100 mm–500 mm.

Vaikuttaa vierintävastukseen sekä rengas- että ajoneuvomeluun.

#### **Vierintävastus**

Ajoneuvon kulkuvastuksen yksi tekijä. Se aiheutuu renkaiden vierintää vastustavasta voimasta ja on ajoneuvon massa \* vierintävastuskerroin.

Vaikuttaa polttoaineenkulutukseen ja päästöihin sekä vastaaviin kustannuksiin.

#### **Ilmanvastus**

Ajoneuvon kulkuvastuksen yksi tekijä, joka aiheutuu ajoneuvon otsapintaan ja myös kuormatilan sivuihin ja kattoon kohdistuvasta ilmanpaineesta ja niiden pinnan ominaisuuksista. Ilmanvastus määräytyy ajoneuvon otsapinta-alan, muotokertoimen ja ajoneuvon nopeuden perusteella (ajoneuvon nopeus ilmaan nähden). Muotokertoimessa otetaan huomioon ajoneuvon koko ja muoto.

#### **Epätasaisuusvastus**

Ajoneuvon kulkuvastuksen yksi tekijä, joka aiheutuu tienpäällysteen epätasaisuudesta. Epätasaisuusvastus määritetään epätasaisen päällysteen aiheuttamana vierintävastuksen lisäyksenä verrattuna hyvän, tasaisen päällysteen vierintävastukseen.

## MITTAUKSISSA KÄYTETTYJEN AJONEUVOJEN OMINAISUUDET

### Henkilöauto:

### Opel Vectra 3.2 V6 GTS

(Lähde: Suomen Opel Oy)

Ajoneuvon massa (tyhjänä)	1503 kg
Ajoneuvon pituus	4596 mm
Akseliväli	2700 mm
Rengaskoko	215/55 R16W/(215/50 R17 Elegance)
Otsapinta-ala ( $A_f$ )	2.18 m <sup>2</sup>
$C_d$ ( $C_v$ )-arvo	0.28
Tehollinen otsapinta-ala, $C_v * A_f$	0.61
Moottorityyppi	V6
Iskutilavuus	3.2 l
Vaihteiden välityssuhteet	
Vaihde 1	3:38
Vaihde 2	1:76
Vaihde 3	1:12
Vaihde 4	0: 89
Vaihde 5	0: 70
Vetopyörästön välityssuhde	4:05

### Ajoneuvoyhdistelmä perävaunu)

### Sisu E14M-530 (Kuorma-auto + varsinainen

(Lähde: Olavi Koskinen, Tiehallinto)

Ajoneuvoyhdistelmän massa tyhjänä	19 400 kg		
Ajoneuvoyhdistelmän kuormattuna	60 700 kg		
Rengaskoko	315/80R225		
Tehollinen otsapinta-ala kuormattuna, $C_v \cdot A_f$	10,98		
Tehollinen otsapinta-ala tyhjänä	9.71		
Moottori	Cummins N14530		
Moottorin maksimiteho	390 kW/1900 rpm		
Iskutilavuus	14 l		
Vaihdelaatikko	Eaton-Fuller RTLO18B		
Vaihteiden välityssuhteet			
Vaihde 1	14.400	Vaihde 10	2.730
Vaihde 2	12.290	Vaihde 11	2.290
Vaihde 3	8.560	Vaihde 12	1.950
Vaihde 4	7.300	Vaihde 13	1.620
Vaihde 5	6.050	Vaihde 14	1.380
Vaihde 6	5.160	Vaihde 15	1.170
Vaihde 7	4.380	Vaihde 16	1.000
Vaihde 8	3.740	Vaihde 17	0.860
Vaihde 9	3.200	Vaihde 18	0.730

Vetopyörästön välityssuhde 4.68

# ESIMERKKI KENTTÄMITTAUSTEN MITTAUSPÖYTÄKIRJASTA

"TIEN HUONON KUNNON LIIKENTEELLISET VAIKUTUKSET" Pöytäkirjan pitäjän nimi Jari Sauna-aho, kuljettaja Pasi Sauna-aho

Tien nro		17519, to 2 alkupaalu muutettu: uusi alkupaalu suoran alussa, tiepituus n. 2065 m									
KAVP		Massa (kg) 19400		Vaaitus pv 28.08.2003 klo 18		HA		Massa (kg) 1590		Vaaitus pv 25.08.2003 klo 13	
Pv: 29.08.2003 Klo 05:31:09		Lämpötila 7.50 C		Ilmanpaine 983.70 hPa		Pv29.08.20 03 Klo 09:50:02		Lämpötila 9.0 C		Ilmanpaine 984.70 hPa	
Vierintäkoe						Vierintäkoe					
Koen		Alkunopeus (km/h)		Suunta		Koen		Alkunop (km/h)		Suunta	
1		95		1		1		122		1	
2		100		2		2		120		2	
.		.		.		.		.		.	
Päätöstilanne: T=6.5 C Klo 05:44:06											
Vakioajotilakoe						Vakioajotilakoe					
Pv: 29.08.2003 Klo 05:54:46		Lämpötila 6.5 C		Ilmanpaine 983.70 hPa		Pv Klo		Lämpötila C		Ilmanpaine hPa	
Koe-nro	Vaihte	Nopeus (km/h)		Suunta		Koe nro	Vaihte	Nopeus (km/h)		Suunta	
1	18	80		1			5	100		1	
2	18	81		2			5	100		2	
3	18	70		1			5	80		1	
4	18	71		2			5	80		2	
5	18	63		1			5	60		1	
6	18	60		2			5	60		2	
7	17	81		1			4	100		1	
.	.	.		.			.	.		.	
17	16	52		1							
18	16	52		2							
Päätöstilanne: T=9.0 Klo 08:18:04											

Tien päällysteen epätasaisuuden vaikutus ajoneuvojen vierintävastukseen ja ajoneuvokustannuksiin  
LIITTEET



**Tien pituusprofiili (ilmanpainelukema) 100 m:n välein: Tienro17519, tieosa 2, Suunta2, Alkupaalu: suoran alussa, tien pit n. 2065 m**

Matka (m)	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
Ilm Paine (hPa)	979.20		979.24		979.24		979.26		979.30		979.34		979.37		979.34	
Matka (m)	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550
Ilm Paine (hPa)	979.34		979.32		979.39		979.36		979.34		979.37		979.35		979.37	
Matka (m)	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000	2050	2100	2150	2200	2250	2300	2350
Ilm Paine (hPa)	979.37		979.39		979.49		979.55		979.55		979.52		979.59		979.68	
Matka (m)	2400	2450	2500	2550	2600	2650	2700	2750	2800	2850	2900	2950	3000	3050	3100	3150
Ilm Paine (hPa)	979.73		979.72		979.67		979.72		979.79		979.90		979.94		979.98	
Matka (m)	3200	3250	3300	3350	3400	3450	3500	3550	3600	3650	3700	3750	3800	3850	3900	3950

Lite 3 (2/2)

Tien päällysteen epätasaisuuden vaikutus ajoneuvojen vierintävastukseen ja ajoneuvokustannuksiin  
LIITTEET

Taulukko 8. Ajoneuvoyhdistelmän polttoaineenkulutus vakioajotilassa eri teillä [l/100 km]

Nopeus [km/h]	Vaihde	Tie 54				Tie 687				Tie 697				Tie 17519			
		K		T		K		T		K		T		K		T	
		Suunta		Suunta		Suunta		Suunta		Suunta		Suunta		Suunta		Suunta	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
90	8H	59.72	43.48	43.94	38.05					56.80	44.79	40.54	36.37				
80	8H	51.79	40.12	37.47	32.83	37.32	60.47	32.96	37.43	55.37	42.22	37.26	32.72	69.99	49.74	35.88	34.15
	8L	51.76	39.89	39.02	34.92					57.18	47.71	38.73	34.87	62.33	52.44	37.42	37.68
	7H																
70	8H	47.83	36.90	32.74	28.67					51.67	38.07	32.22	28.01	63.45	44.43	31.39	30.93
	8L	45.51	36.09	32.57	31.57					54.59	39.34	34.05	29.10	60.32	46.91	32.47	33.36
	7H	46.84	37.77	33.89	33.15					56.23	44.56	35.32	30.82	61.56	48.24	34.36	34.54
60	8H													55.19	42.19	28.49	27.12
60	8L	42.22	33.70	29.63	27.72					51.61	39.06	30.43	25.80	53.62	42.40	29.19	29.45
	7H	41.85	34.52	29.77	29.66					52.95	40.28	30.94	27.43	53.91	41.36	30.55	31.24
50	7H	39.88	34.44	27.04	25.96					49.20	36.62	28.02	24.09	50.36	39.95	27.61	27.94

Taulukko 9. Vertailu- ja koeteiden IRI- ja RMS-arvojen keskiarvot

Tie ja sen osa(t)	Suunta	IRI oikea	IRI vasen	RMS1 oikea	RMS1 vasen	RMS2 oikea	RMS2 vasen	RMS3 oikea	RMS3 vasen	RMS4 oikea	RMS4 vasen	RMSM oikea	RMSM keski	RMSR oikea	RMSR keski
54/14	1	1,09	0,99	0,14	0,11	0,20	0,16	0,20	0,16	2,19	2,16	0,17	0,22	0,30	0,27
	2	1,21	1,16	0,13	0,11	0,17	0,20	0,17	0,16	2,70	2,46	0,15	0,24	0,24	0,30
687/8-9	1	1,42	1,67	0,16	0,18	0,29	0,34	0,60	0,74	2,60	2,84	0,32	0,28	0,48	0,44
	2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
697/4-5	1	1,38	1,33	0,11	0,08	0,24	0,22	0,57	0,66	3,11	2,85	0,38	0,22	0,58	0,36
	2	1,42	1,23	0,11	0,06	0,24	0,18	0,70	0,59	3,13	2,92	0,29	0,22	0,48	0,35
17519/2	1	2,52	2,33	0,31	0,31	0,60	0,58	1,18	1,08	4,14	3,49	0,42	0,46	0,59	0,67
	2	2,49	2,39	0,30	0,29	0,58	0,58	1,19	1,14	4,30	3,75	0,47	0,46	0,65	0,67

\* Alkuperäisaineistossa virhe, tunnusluvut tulevat negatiivisiksi.



Taulukko 10. Arvio tienpäällysteen epätasaisuuden vaikutuksesta ajoneuvojen polttoaineenkulutukseen ja -kustannuksiin valta-, kanta- ja seututeillä

Tiestö ja liikenne: Päällystetyt valta-, kanta- ja seututiet sekä niillä arvioitu liikennesuorite ajoneuvoryhmittäin v. 2003

**a) IRI-epätasaisuudella mitatun päällysteen epätasaisuuden vaikutus ajoneuvojen vierintävastukseen**

		IRI-epä- tasaisuus	Vierintävastuksen lisäys [%] /1/	
Päällysteen kunto			Henkilöautot	Kuorma-autot
Hyvä		1	0	0
Tyydyttävä		2	4	2,5
Huono		4	12	7,5

**b) Vierintävastus ajoneuvoryhmittäin päällysteen kunnon mukaan**

Ajoneuvoryhmä		Vierintävastus (vakio-osa) päällysteen kunnon mukaan		
		Hyvä pääl- lyste	Tyydyttävä päällyste	Huono päällyste
Henkilöautot		0,0125	0,013	0,014
Pakettiautot		0,0125	0,013	0,014
Linja-autot		0,0085	0,00871	0,00914
Kuorma-autot ilman perävaunuja		0,0085	0,00871	0,00914
Kuorma-autot + puoliperävaunut		0,0070	0,00718	0,00753
Kuorma-autot + varsinaiset perä- vaunut		0,0070	0,00718	0,00753

**c) Polttoaineenkulutus ajoneuvoryhmittäin päällysteen kunnon mukaan**

Ajoneuvoryhmä	Keskinopeus	Ajoneuvosimulointiin perustuva keskikulutus Helsinki - Turku-yhteyden mukaan		
	[km/h]		[l/100 km]	
		Hyvä pääl- lyste	Tyydyttävä päällyste	Huono päällyste
Henkilöautot	90	7,08	7,16	7,31
Pakettiautot	90	7,25	7,3	7,41
Linja-autot	90	26,5	26,73	27,14
Kuorma-autot ilman perävaunuja	80	31,01	31,31	31,96
Kuorma-autot + puoliperävaunut	80	40,84	41,21	42,02
Kuorma-autot + varsinaiset perä- vaunut	80	52,06	52,59	53,73

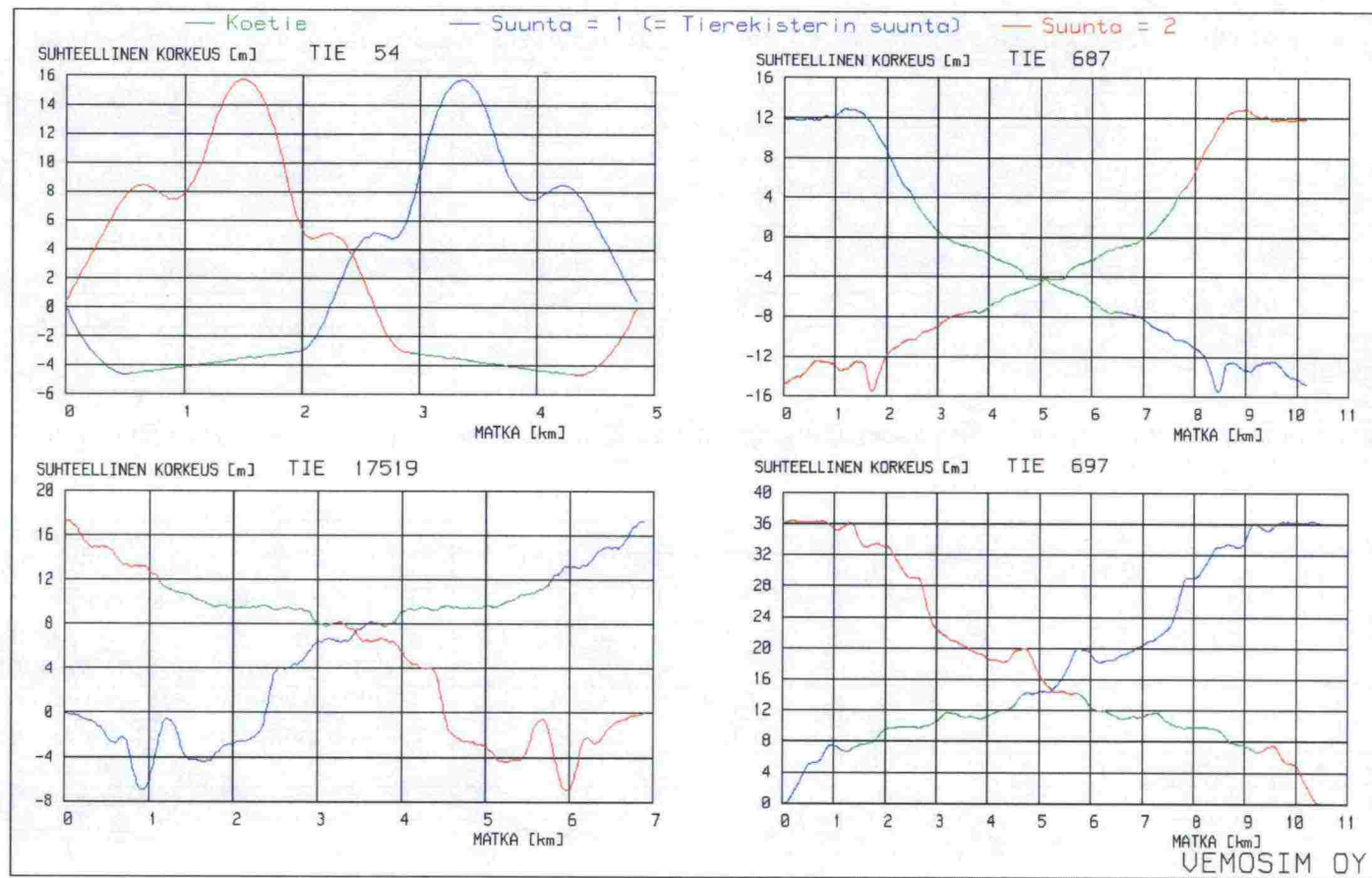
## d) Polttoaineenkulutuksen lisäys valta-, kanta- ja seututeillä siirryttäessä hyvältä päällysteeltä tyydyttävälle tai huonolle päällysteelle

Ajoneuvoryhmä	Liikennesuorite	Polttoaineen kulutuslisäys valta-, kanta- ja seututeillä siirryttäessä hyvältä päällysteeltä		
		tyydyttävälle päällysteelle		huonolle päällysteelle
	[milj. km/a]	[l/100 km]	[MI/a]	[MI/a]
Henkilöautot	22 539	0,08	18,0	51,8
Pakettiautot	1 955	0,05	1,0	3,1
Linja-autot	328	0,23	0,8	2,1
Kuorma-autot ilman perävaunuja	199	0,30	0,6	1,9
Kuorma-autot + puoliperävaunut	199	0,37	0,7	2,3
Kuorma-autot + varsinaiset perävaunut	966	0,53	5,1	16,1
Koko liikenne yhteensä				
Bensiini (henkilöautot)			18,0	51,8
Dieselöljy (muut autot)			8,2	25,6

## e) Polttoainekustannusten lisäys valta-, kanta- ja seututeillä siirryttäessä hyvältä päällysteeltä tyydyttävälle tai huonolle päällysteelle

Polttoainekustannusten lisäys valta-, kanta- ja seututeillä siirryttäessä hyvältä päällysteeltä				
	Yksikköhinta	tyydyttävälle päällysteelle		huonolle päällysteelle
Polttoaineen kustannuslisäys	[€/l]	[M€]		[M€]
bensiini: verollinen	1,15	20,7		59,6
veroton	0,43	7,8		22,3
dieselöljy: verollinen	0,85	7,0		21,8
veroton	0,46	3,8		11,8
Yhteensä: verollinen		27,7		81,4
veroton		11,5		34,1

Huom! Lisäksi muut muuttuvat ajoneuvokustannukset kasvavat polttoaineenkulutuksen kanssa lineaarisesti.



Kuva 17. Koetiet sisältävien tieosien tasausviivat suunnittain



## d) Polttoaineenkulutuksen lisäys valta-, kanta- ja seututeillä siirryttäessä hyvältä päällysteeltä tyydyttävälle tai huonolle päällysteelle

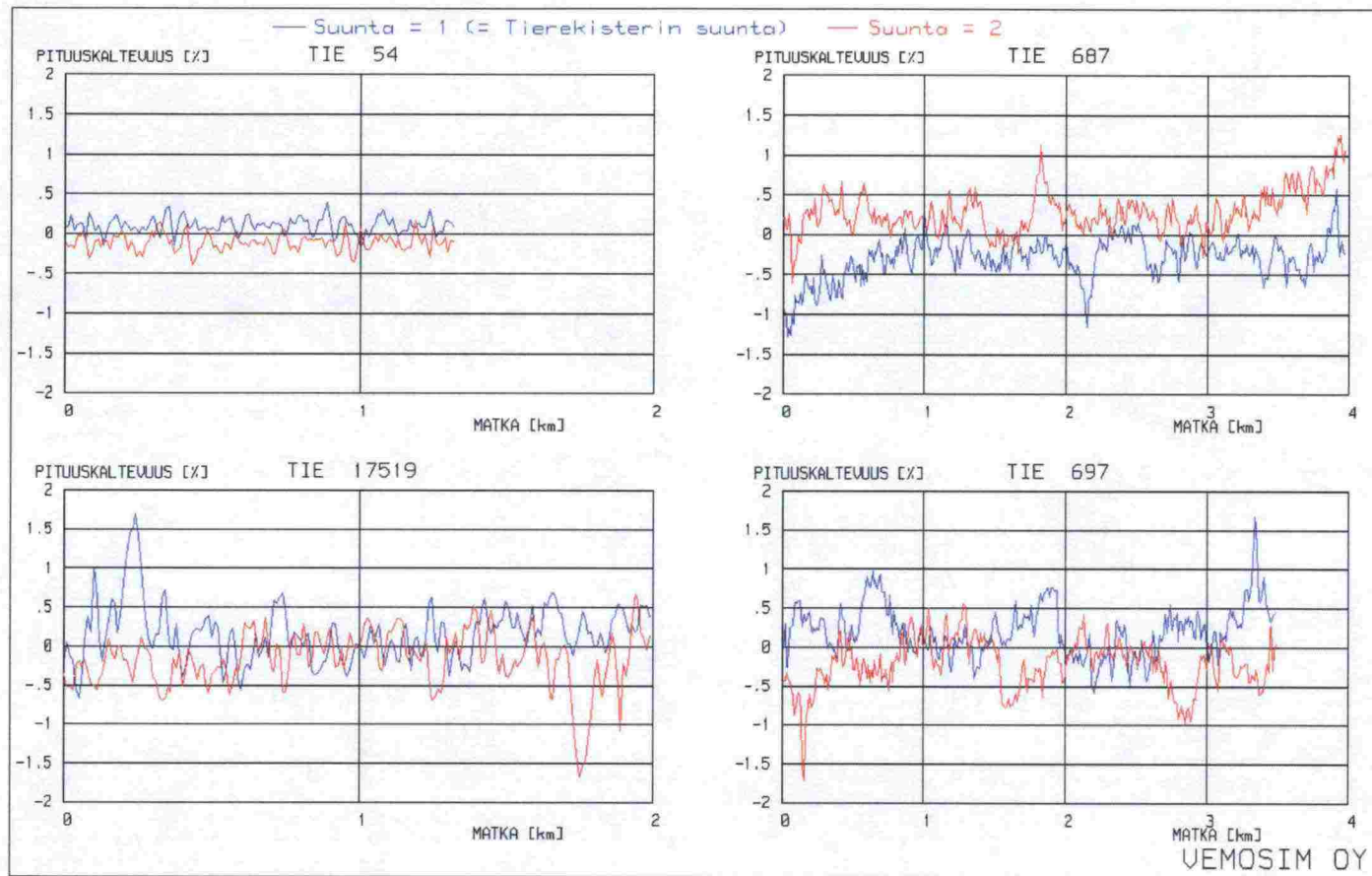
Ajoneuvoryhmä	Liikennesuori- te	Polttoaineen kulutuslisäys valta-, kanta- ja seututeillä siirryttäessä hyvältä päällysteeltä		
		tyydyttävälle päällysteelle		huonolle päällysteelle
	[milj. km/a]	[l/100 km]	[MI/a]	[MI/a]
Henkilöautot	22 539	0,08	18,0	51,8
Pakettiautot	1 955	0,05	1,0	3,1
Linja-autot	328	0,23	0,8	2,1
Kuorma-autot ilman perävaunuja	199	0,30	0,6	1,9
Kuorma-autot + puoliperävaunut	199	0,37	0,7	2,3
Kuorma-autot + varsinaiset perä- vaunut	966	0,53	5,1	16,1
Koko liikenne yhteensä				
Bensiini (henkilöautot)			18,0	51,8
Dieselöljy (muut autot)			8,2	25,6

## e) Polttoainekustannusten lisäys valta-, kanta- ja seututeillä siirryttäessä hyvältä päällysteeltä tyydyttävälle tai huonolle päällysteelle

	Yksikköhinta	Polttoainekustannusten lisäys valta-, kanta- ja seututeillä siirryttäessä hyvältä päällysteeltä		
		tyydyttävälle päällysteelle		huonolle päällysteelle
Polttoaineen kustannuslisäys	[€/l]	[M€]		[M€]
bensiini: verollinen	1,15	20,7		59,6
veroton	0,43	7,8		22,3
dieselöljy: verollinen	0,85	7,0		21,8
veroton	0,46	3,8		11,8
<b>Yhteensä: verollinen</b>		<b>27,7</b>		<b>81,4</b>
<b>veroton</b>		<b>11,5</b>		<b>34,1</b>

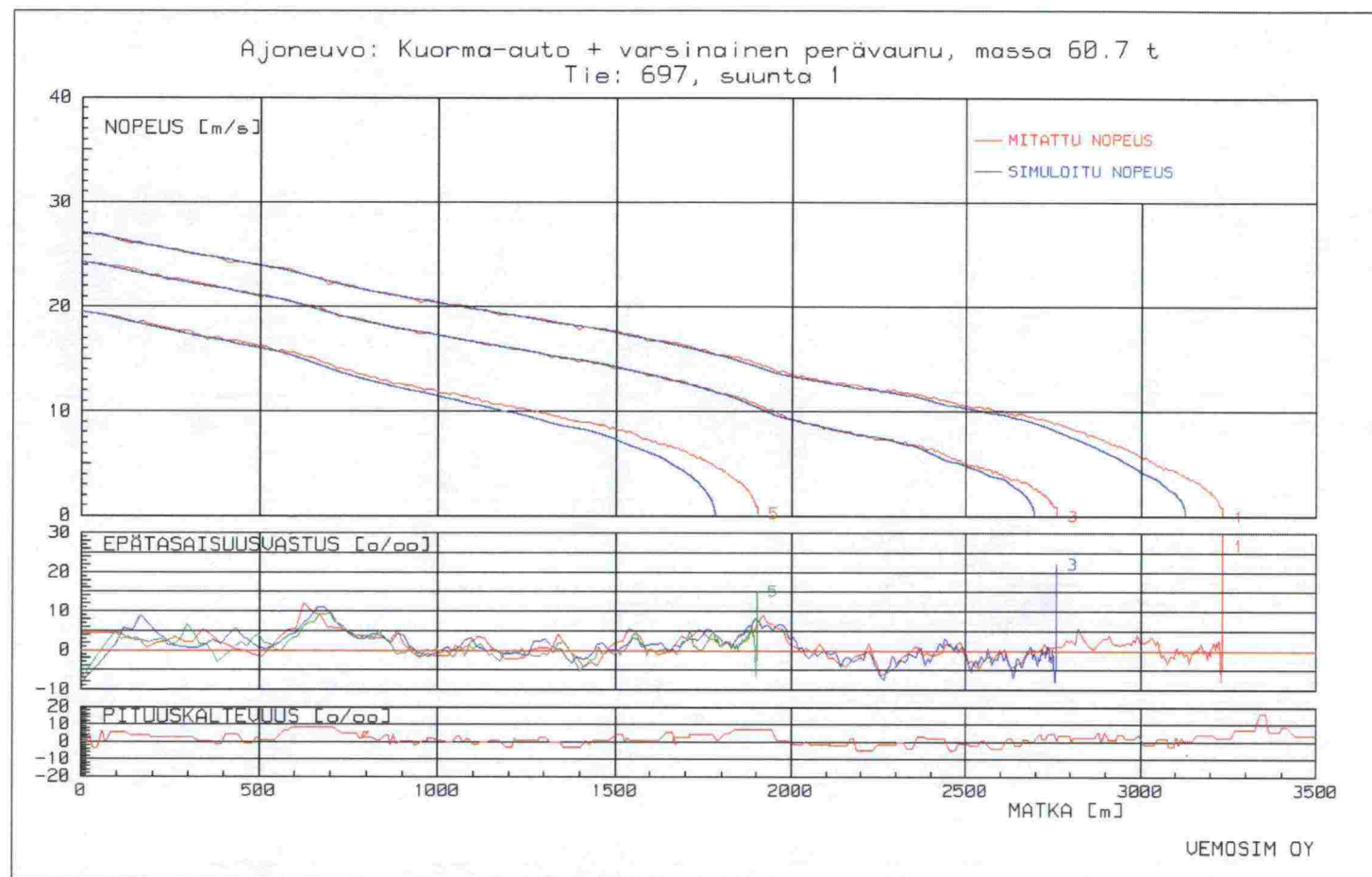
Huom! Lisäksi muut muuttuvat ajoneuvokustannukset kasvavat polttoaineenkulutuksen kanssa lineaarisesti.



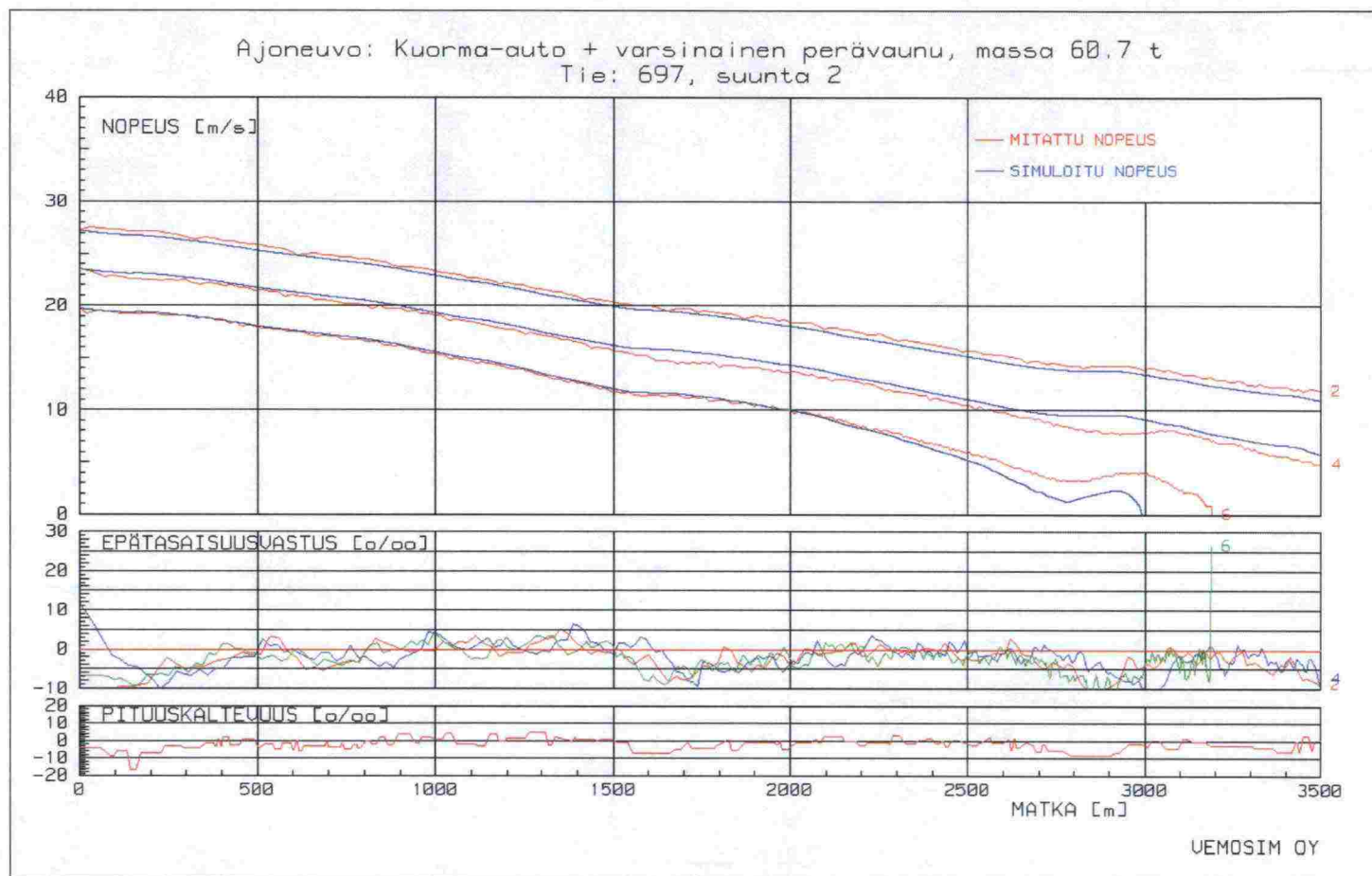


Kuva 18. Koeteiden pituuskaltevuudet suunnittain

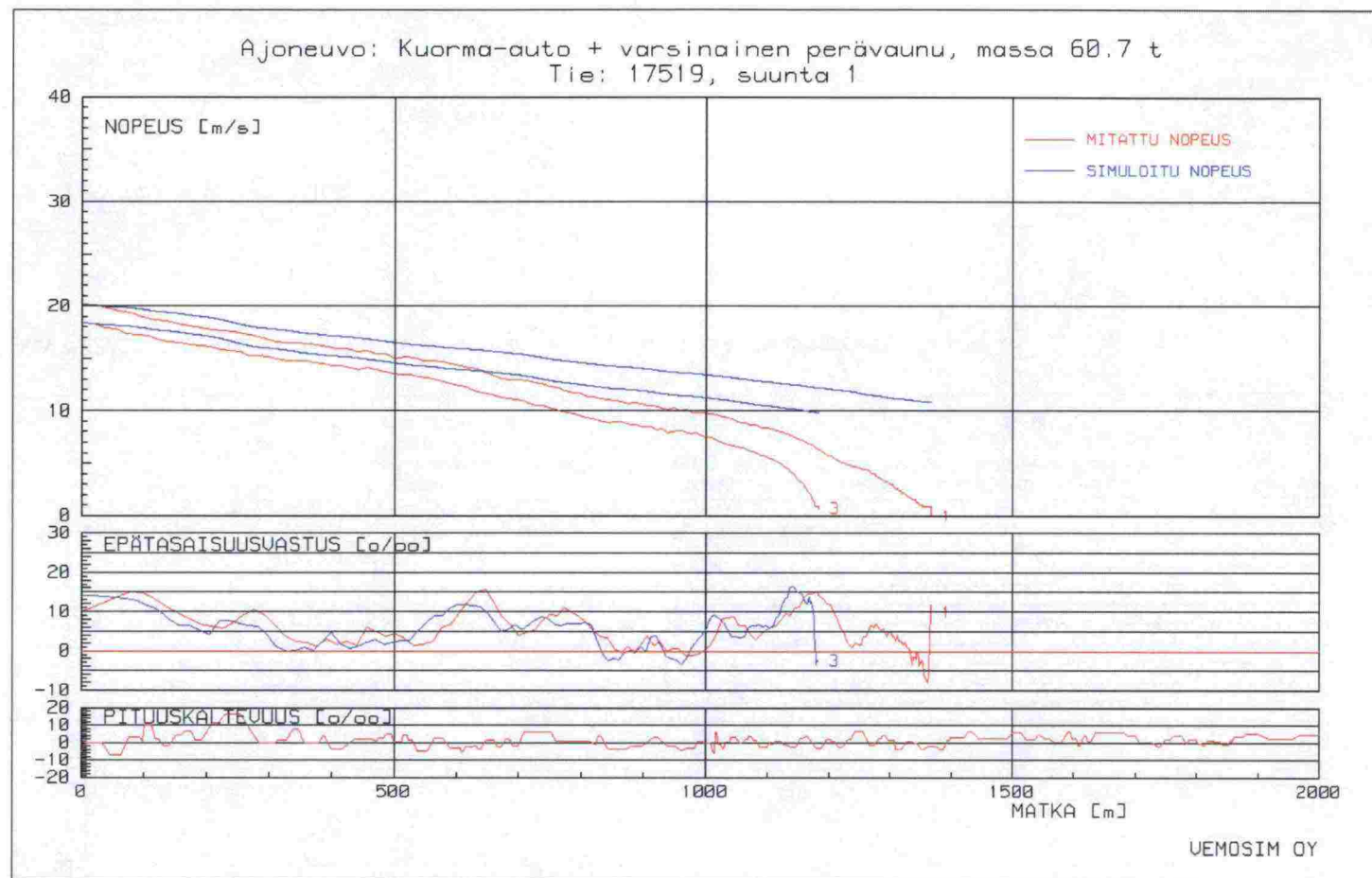




Kuva 19. Kuormatun ajoneuvoyhdistelmän vierintä tiellä 697 suunnassa 1

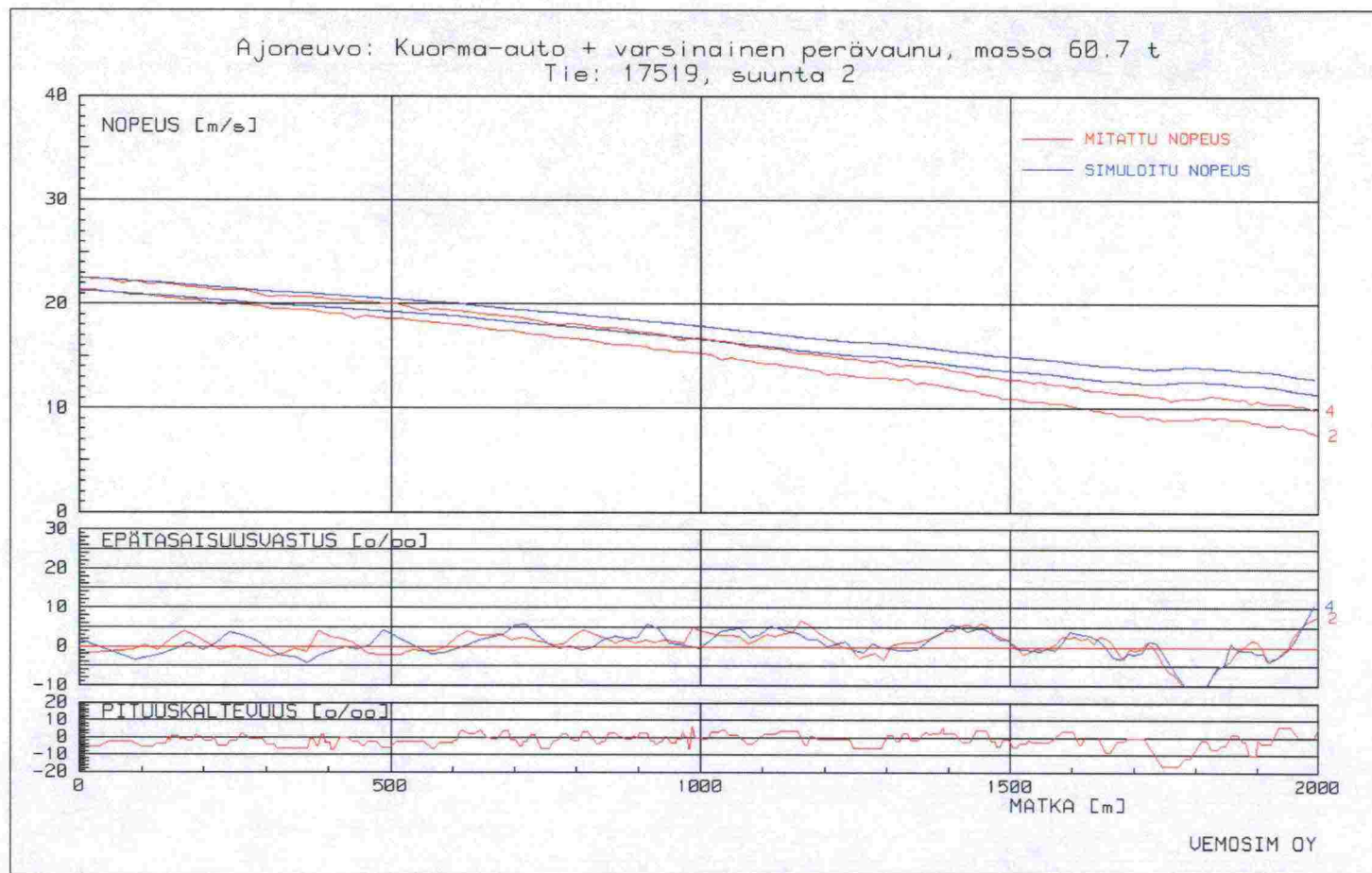


Kuva 20. Kuormatun ajoneuvoyhdistelmän vierintä tiellä 697 suunnassa 2

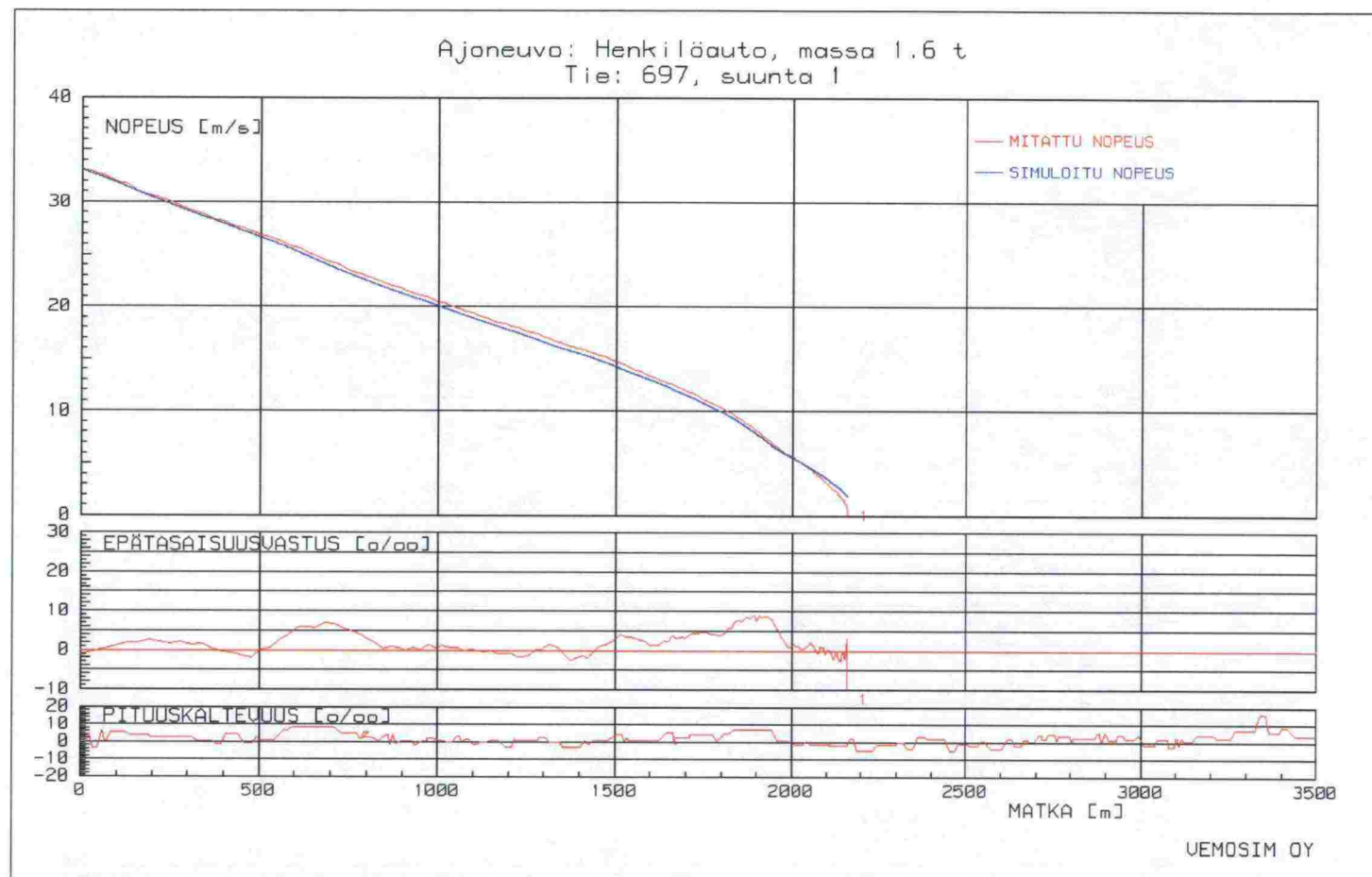


Kuva 21. Kuormatun ajoneuvoyhdistelmän vierintä tiellä 17519 suunnassa 1

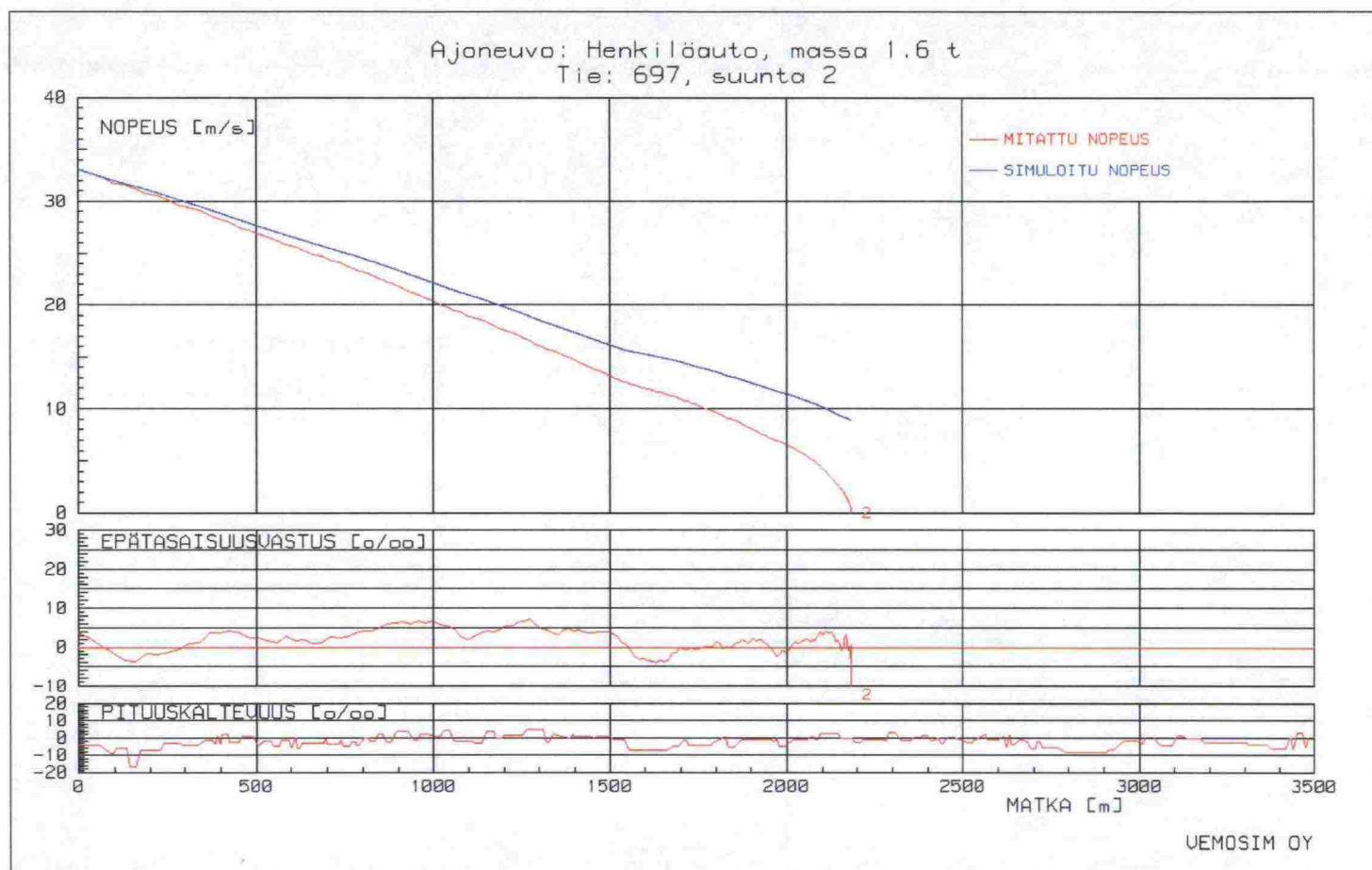




Kuva 22. Kuormatun ajoneuvoyhdistelmän vierintä tiellä 17519 suunnassa 2

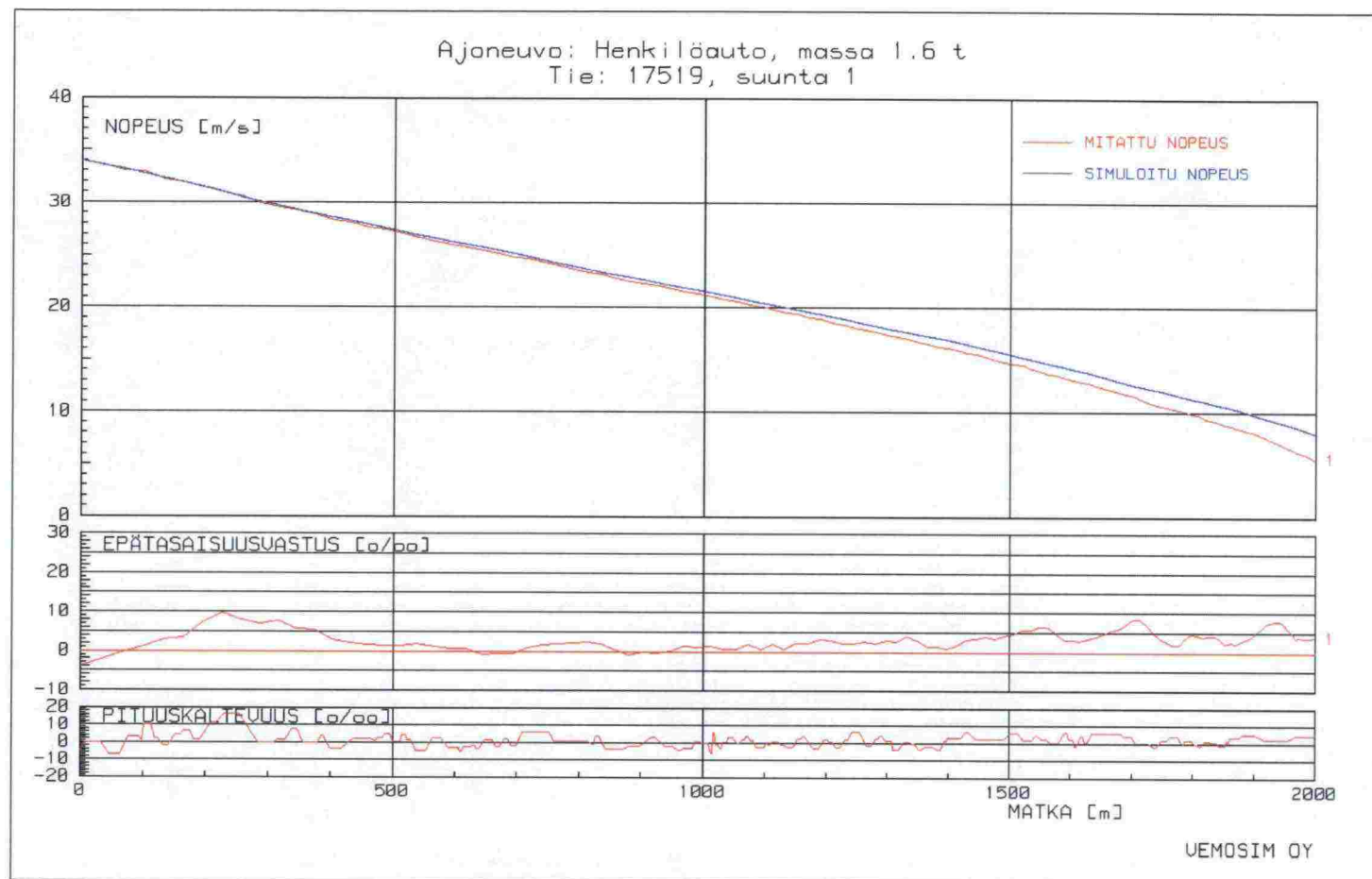


Kuva 23. Henkilöauton vierintä tiellä 697 suunnassa 1

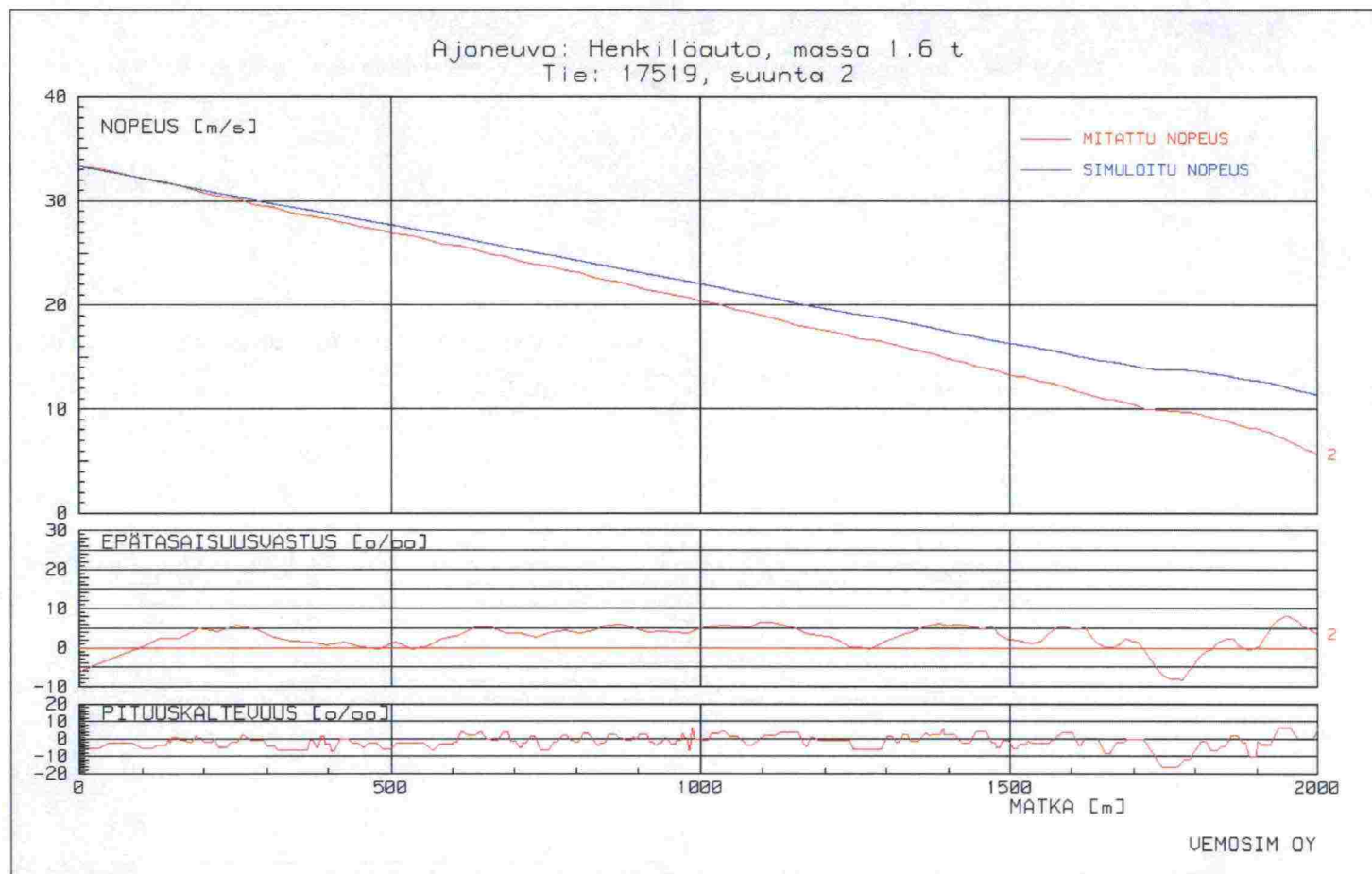


Kuva 24. Henkilöauton vierintä tiellä 697 suunnassa 2

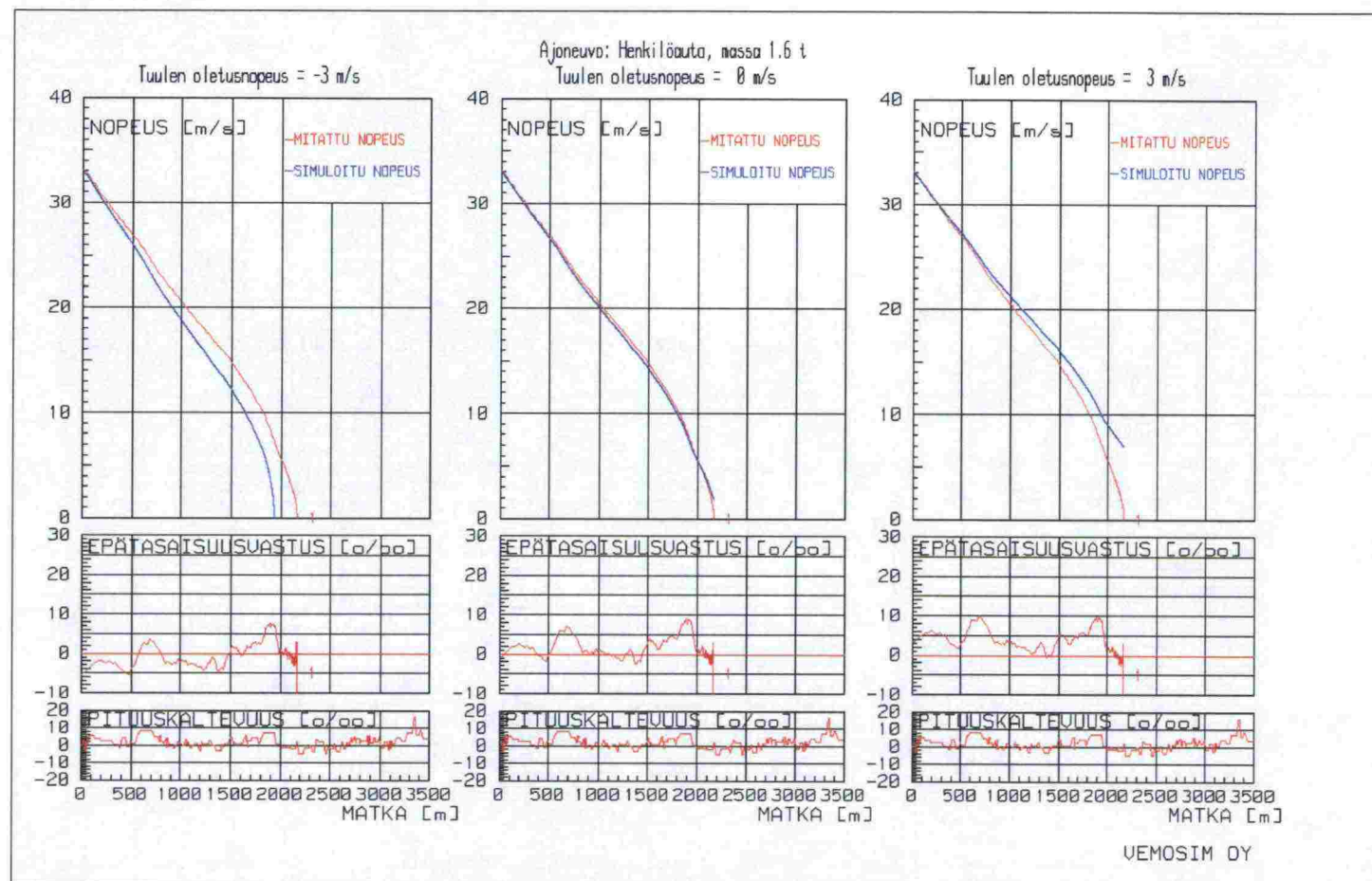




Kuva 25. Henkilöauton vierintä tiellä 17519 suunnassa 1

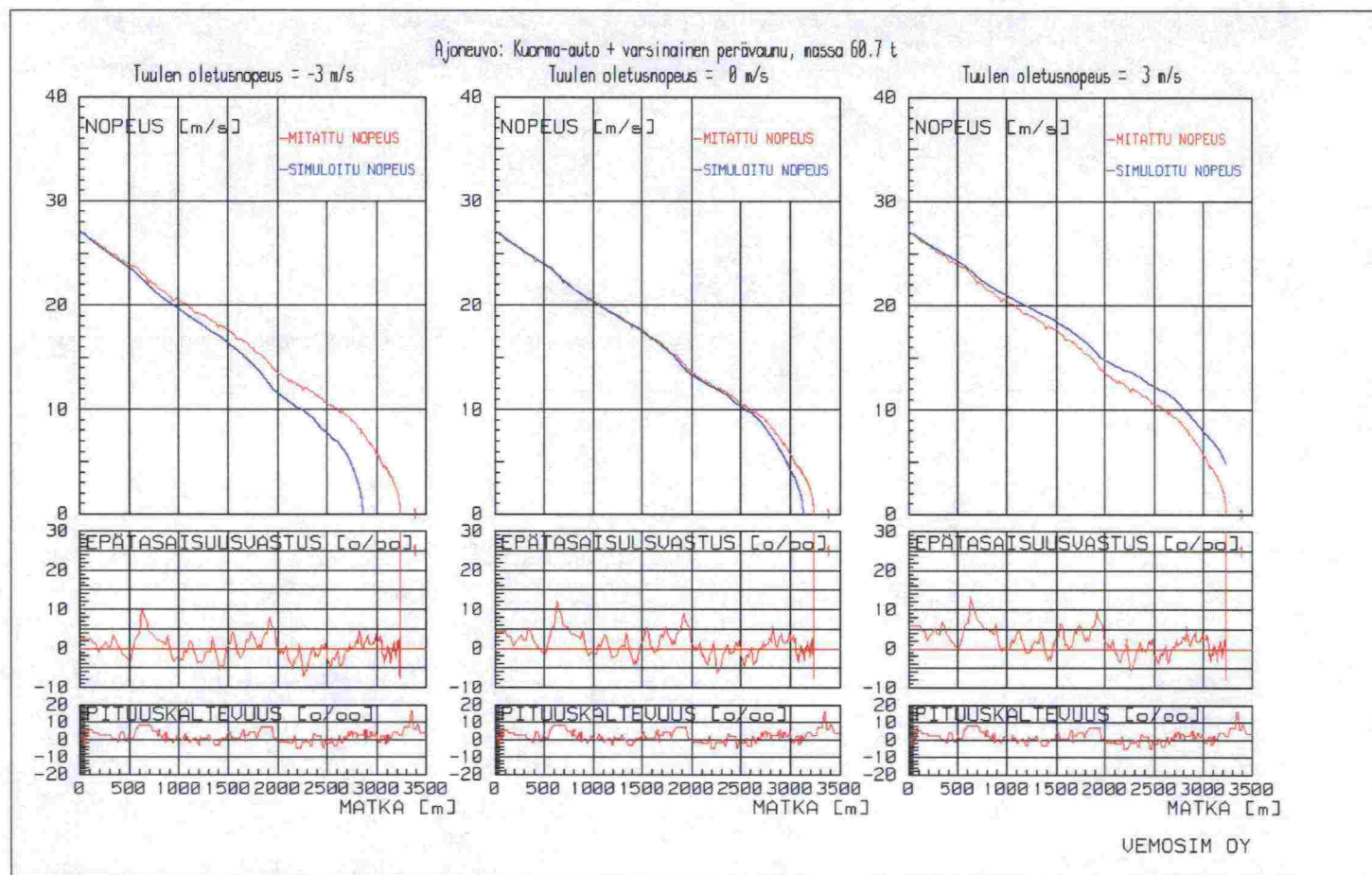


Kuva 26. Henkilöauton vierintä tiellä 17519 suunnassa 2

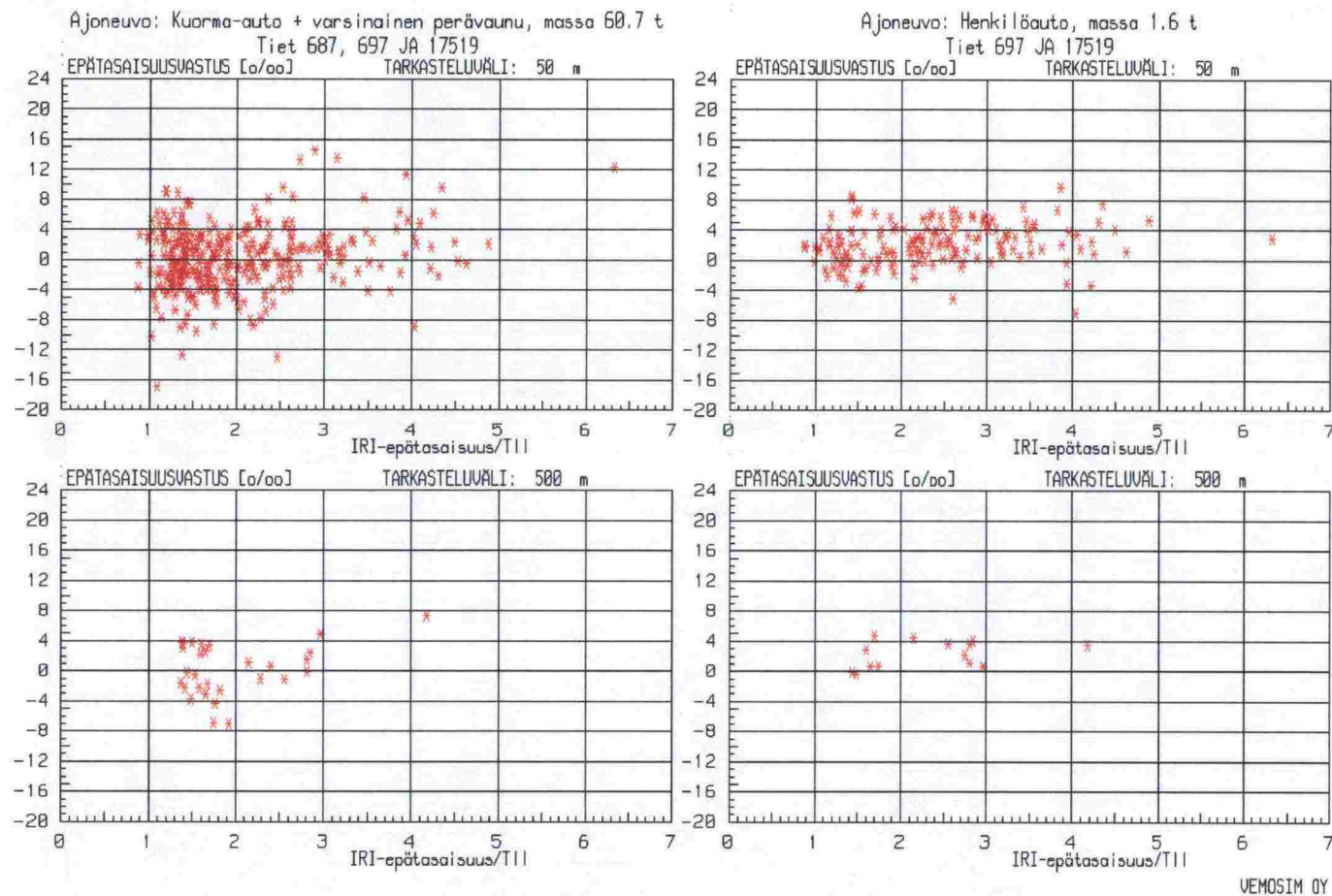


Kuva 27. Tuulen vaikutus henkilöauton nopeuteen vierinnässä

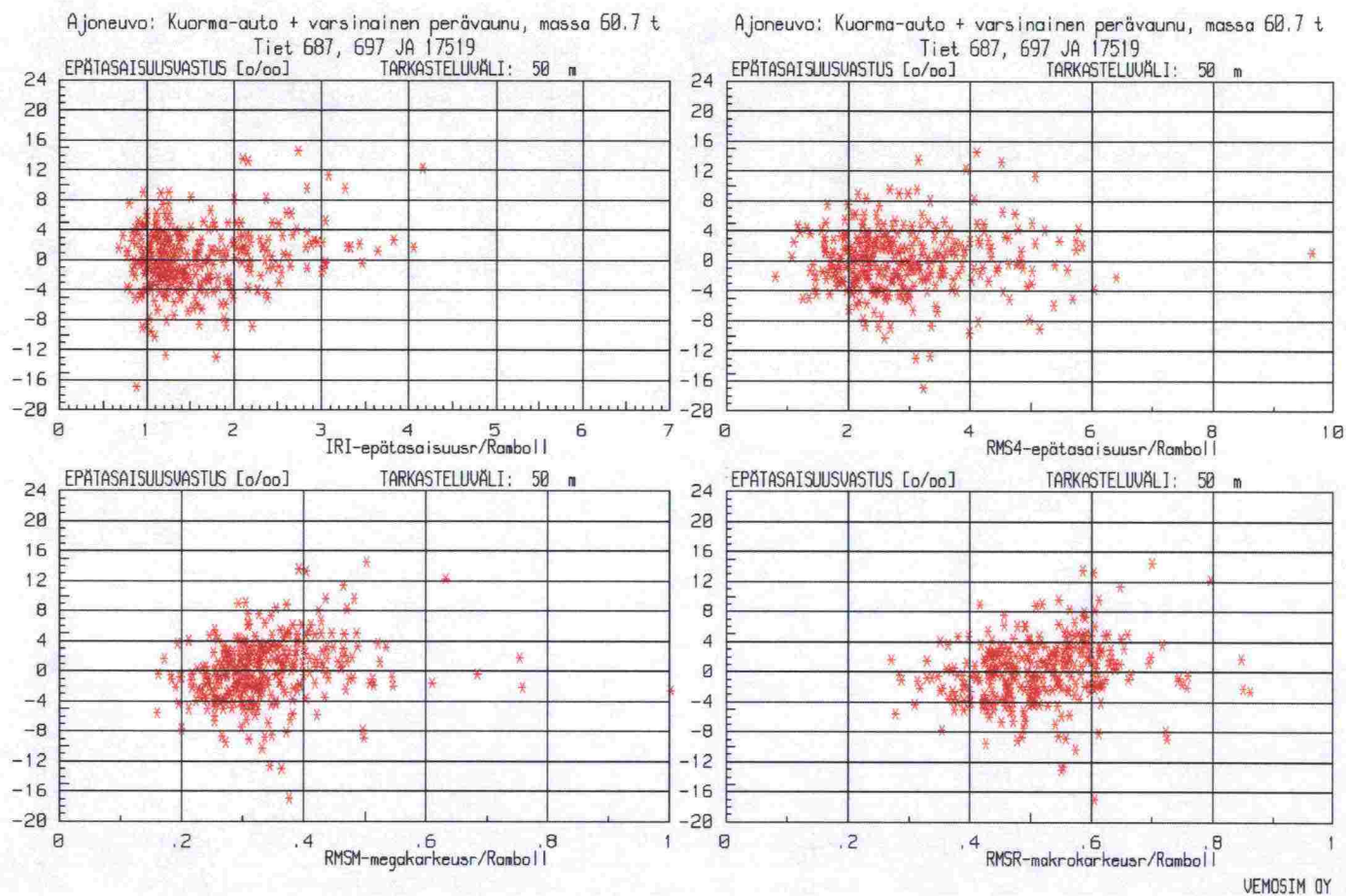




Kuva 28. Tuulen vaikutus kuormatun ajoneuvoyhdistelmän nopeuteen vierinnässä

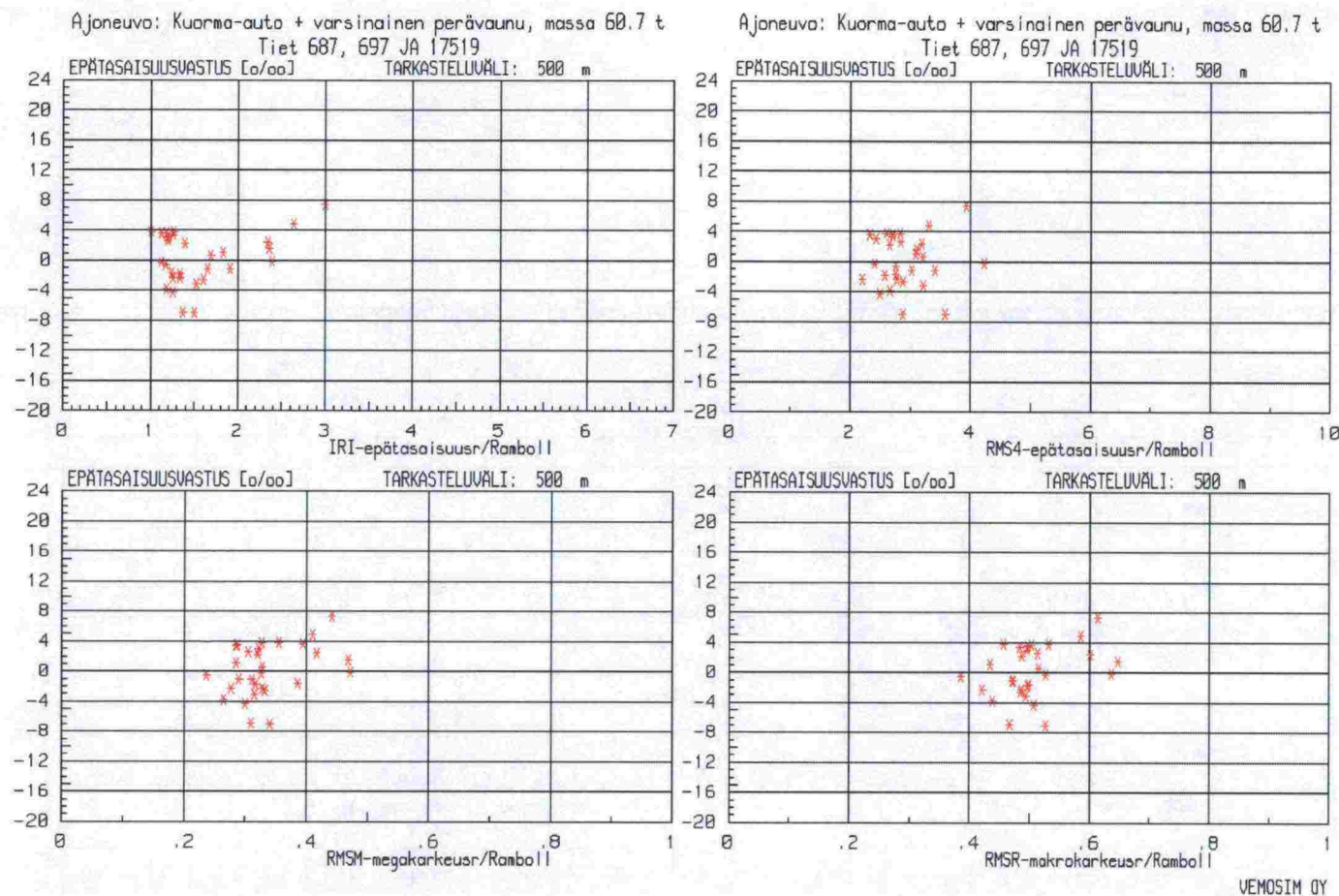


Kuva 29. 50 ja 500 m:n jaksoilta määritetyn IR-epätasaisuuden vaikutus ajoneuvoyhdistelmän ja henkilöauton epätasaisuusvastukseen

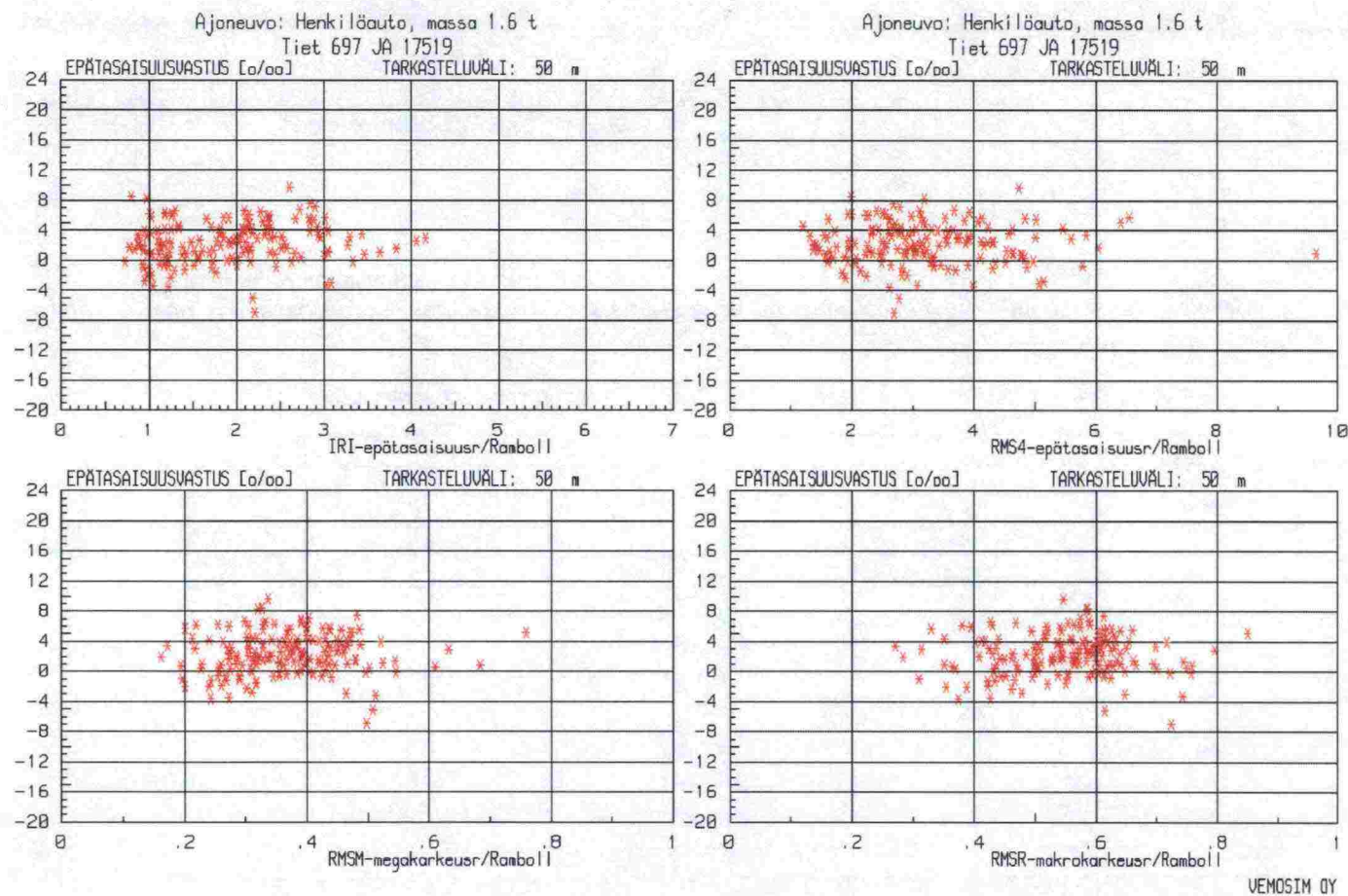


Kuva 30. 50 m:n jaksoilta määritettyjen IRI- ja RMS4-epätasaisuuksien sekä RMSM-megakarkeuden ja RMSR-makrokarkeuden vaikutukset ajoneuvoyhdistelmän epätasaisuusvastukseen

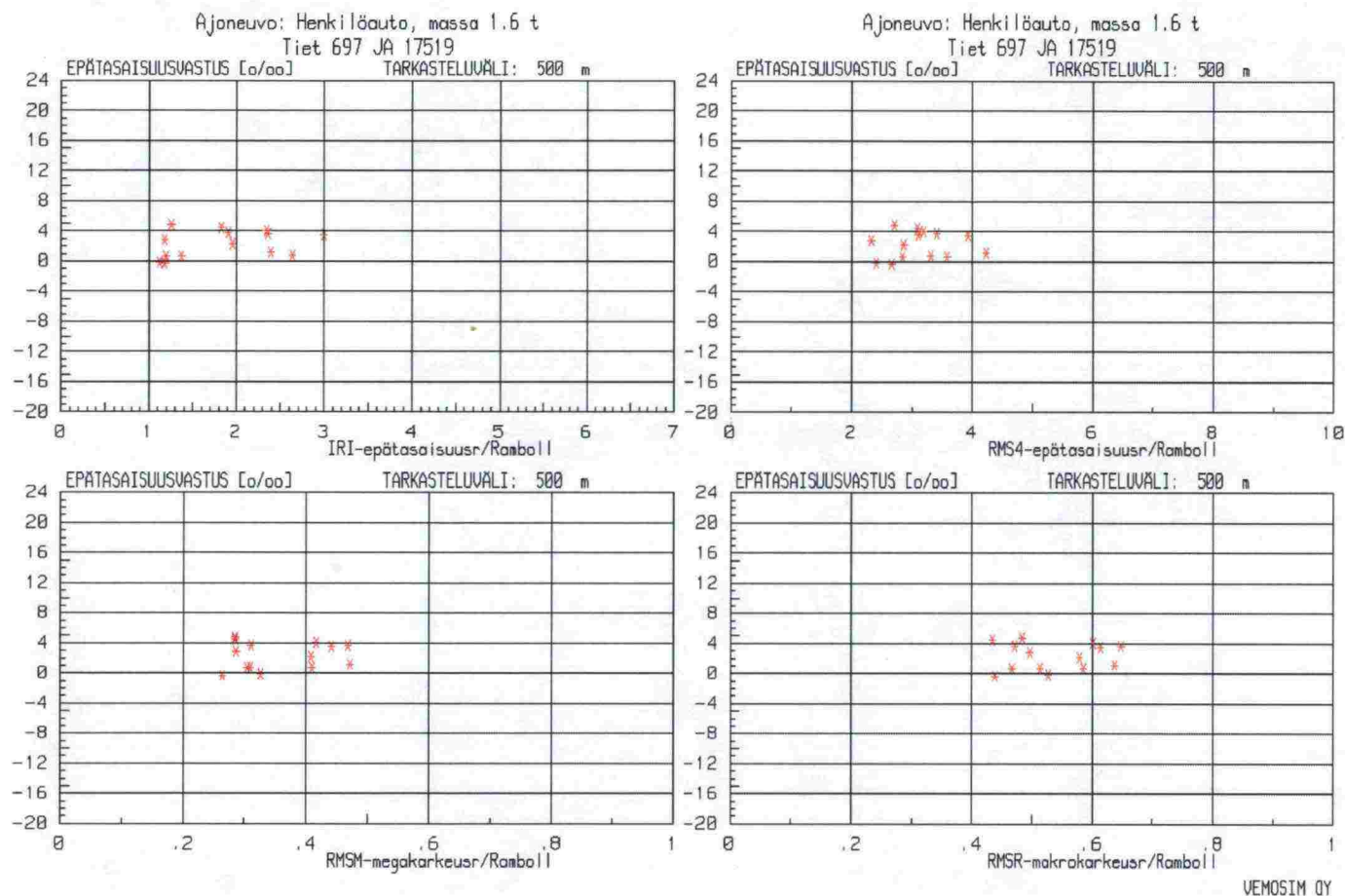




Kuva 31. 500 m:n jaksoilta määritettyjen IRI- ja RMS4-epätasaisuuksien sekä RSM-megakarkeuden ja RMSR-makrokarkeuden vaikutukset ajoneuvoyhdistelmän epätasaisuusvastukseen



Kuva 32. 50 m:n jaksoilta määritettyjen IRI- ja RMS4-epätasaisuuksien sekä RMSM-megakarkeuden ja RMSR-makrokarkeuden vaikutukset henkilöauton epätasaisuusvastukseen



Kuva 33. 500 m:n jaksoilta määritettyjen IRI- ja RMS4-epätasaisuuksien sekä RMSM-megakarkeuden ja RMSR-makrokarkeuden vaikutukset henkilöauton epätasaisuusvastukseen





ISSN 1459-1553  
ISBN 951-803-514-8  
TIEH 3200939-v